



**João Tiago Borges
Baptista**

**Inversor 24V/230V para sistemas domésticos de
produção de energia: projecto e construção de um
protótipo**



**João Tiago Borges
Baptista**

**Inversor 24V/230V para sistemas domésticos de
produção de energia: projecto e construção de um
protótipo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica dos

Prof. Dr. Rui Manuel Escadas Ramos Martins, professor auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro,

e

Prof. Dr. António Ferreira Pereira de Melo, professor catedrático do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

o júri

presidente

Prof. Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota
professor associado
da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Dr. Carlos Alberto Caridade Monteiro Couto
professor catedrático
da Universidade do Minho
(arguente principal)

Prof. Dr. Rui Manuel Escadas Ramos Martins
professor auxiliar
da Universidade de Aveiro
(orientador)

Prof. Dr. Rui António Ferreira Pereira de Melo
professor catedrático
da Universidade de Aveiro
(co-orientador)

agradecimentos

Agradeço ao meu orientador científico Prof. Dr. Rui Manuel Escadas Ramos Martins, por ter sido muito mais que um professor para mim; encontrar um dotado professor pode não ser árduo, mas ter o prazer de ser conduzido por um, que além disso é um ser humano fora de série, foi sem dúvida um enormíssimo privilégio para mim. Foi por demais fácil e recompensador receber os ensinamentos e aprender a admirar um Homem que faz aquilo que gosta, todos os dias.

Um registo de gratidão ao meu co-orientador científico Prof. Dr. Rui António Ferreira Pereira de Melo, pela presteza e celeridade com que aceitou, corrigiu e astutamente fez os reparos certos nos sítios correctos ao presente documento.

Uma palavra especialíssima ao meu “vice-orientador”, colega e predecessor desta empreitada, doutorando Eng. Ricardo Jorge Sequeira Matias, pelo espírito errante nunca saciado de conhecimento (que à sua muito especial maneira), me empurrou para as minhas metas e me incitou sempre em direcção ao sucesso, ao empenho e ao próximo saltar de obstáculo.

Aos companheiros da mítica sala 234 e restantes colegas: doutorando Eng. Daniel Albuquerque pela disponibilidade interminável, ao mestrando Vítor Ribeiro pela palavra sempre simpática, ao Eng. Ricardo Marques (e demais pessoal da Bosch), pela tolerância dos abusos do seu material. Ainda o colega Eng. Dionísio Rolo que me deu o empurrão e ânimo crucial no fim deste projecto.

À *staff* do DETI, quer diurna — como todos os professores da ala norte, pela constante palavra de apoio e empatia de quem me via à porta do meu orientador constantemente, o Sr. Paulo Martins das oficinas e placas impressas por ser um artífice soberbo com os poucos recursos ao seu dispor, e o Sr. António Pereira do armazém do DETI, pela enorme paciência e humor com que sempre disponibilizou os meus pedidos de material —, quer *staff* nocturna — como o Sr. Alberto, segurança do departamento pela paciência e calma com que lidou comigo sempre que pelo meu trabalho noctívago teve de ir para casa mais tarde.

Por fim, o agradecimento mais atrasado, o que demorou mais anos a ser escrito: aos meus pais, por todos os esforços visíveis que fizeram para este culminar de tempo de estudo e distância; e os mais importantes: os esforços invisíveis, aqueles que só se sentem no coração. Se um dia for metade do que eles foram para mim, serei um excelente pai.

palavras-chave

inversor, energia eólica, fonte comutada, microcontrolador, aerogerador, microgeração

resumo

A presente dissertação propõe a conclusão do projecto e consequente construção de um protótipo de um inversor *true-sinewave* de 1 kW capaz de ser ligado directamente à rede eléctrica.
O inversor está preparado para que a gama de tensão de entrada possa variar pelo menos de 18 a 30 Volt e é controlado por microcontroladores capazes de total monitorização do sistema, inclusive remota.

keywords

inverter, wind energy, switching power supply, microcontroller, grid-connected, wind turbine

abstract

This work aims to conclude the design and total implementation of a true-sinewave grid-connected inverter of 1 kW. The input tension (in which the inverter can operate) may vary between 18 and 30 Volt at least, and all system control is supported by microcontrollers that allow remote monitoring also.

ÍNDICE GERAL

0	Introdução.....	1
0.1	Contexto e Enquadramento do Trabalho.....	2
0.2	Motivação	2
0.3	Objectivos.....	3
0.4	Metodologia.....	3
0.5	Estrutura do documento	4
1	Geração Distribuída de Energia Eléctrica.....	5
1.1	Energia Geotérmica	6
1.1.1	Desvantagens da Energia Geotérmica na Produção Doméstica.....	6
1.1.2	Vantagens da Energia Geotérmica na Produção Doméstica	7
1.2	Energia Hídrica	7
1.2.1	Desvantagens da Energia Hídrica na Produção Doméstica	7
1.2.2	Vantagens da Energia Hídrica na Produção Doméstica.....	8
1.3	Energia Solar — Fotovoltaica	8
1.3.1	Desvantagens da Energia Solar na Produção Doméstica.....	8
1.3.2	Vantagens da Energia Solar na Produção Doméstica.....	8
1.4	Energia Eólica	9
1.4.1	Desvantagens da Energia Eólica na Produção Doméstica.....	9
1.4.2	Vantagens da Energia Eólica na Produção Doméstica	10
1.5	Geração Distribuída: Comparação.....	10
2	Inversores.....	13
2.1	Conceito de Inversor.....	14
2.1.1	Inversor <i>Stand-Alone</i>	14
2.1.2	Inversor <i>Grid-Connected</i> (ou <i>Grid-Tie</i>).....	15
2.1.3	Inversor com saída <i>True-Sinewave</i> (ou <i>Pure-Sinewave</i>).....	15
2.2	Inversores para Eólica vs. Solar	16
2.3	Topologias de Inversores	17
2.3.1	Noções de Reguladores Lineares	17
2.3.2	Conceitos de Comutação	18
2.3.2.1	Lei da Indutância	18
2.3.2.2	Considerações Gerais sobre Transformadores	19
2.3.2.3	Modulação por Largura de Pulso, PWM.....	22

2.3.3	Topologias de Reguladores de Comutação	24
2.3.3.1	Regulador Buck.....	24
2.3.3.2	Regulador Boost	26
2.3.3.3	Regulador Buck-Boost (Inversor).....	27
2.3.3.4	Regulador Flyback	27
2.3.3.5	Regulador Push-Pull.....	29
2.3.3.6	Regulador de Meia-Ponte.....	30
2.3.3.7	Regulador de Ponte-Completa	32
2.3.4	Princípios de Fontes de Potência Comutadas.....	33
2.3.5	Inversores.....	36
2.3.6	Transformador de Potência no Inversor: o Primário	39
2.3.7	Transformador de Potência no Inversor: o Secundário	41
2.3.7.1	Proposta de Enrolamento Duplo no Secundário (Energia Unidireccional)	44
3	Regulamentação sobre Inversores	47
3.1	Microprodução em Portugal.....	47
3.1.1	Como ser Microprodutor em Portugal	48
3.1.1.1	Avaliação	48
3.1.1.2	Registo	48
3.1.1.3	Instalação.....	48
3.1.1.4	Comercialização	48
3.2	Legislação Portuguesa sobre Microprodução.....	48
3.2.1	Regime Jurídico Nacional.....	49
3.2.1.1	Portaria nº201/2008 de 22 de Fevereiro.....	49
3.2.1.2	Decreto Legislativo Regional nº16/2008/M	49
3.2.1.3	Despacho do Director Geral de Energia e Geologia	49
3.3	Inversores homologados	51
3.4	Dados Estatísticos Nacionais de Microprodução	51
3.5	Homologação Técnica de Inversores.....	52
3.5.1	Normas Gerais — CENELEC CLC/TC 8X	53
3.5.2	Norma DIN VDE 0126-1-1:2006.....	54
3.5.3	Outras Directivas e Normas Europeias Relevantes	55
3.5.3.1	Normas Europeias e Respectivas Modificações	55
4	Projecto de Hardware de Potência	57
4.1	Projecto de Transformadores e Indutâncias	57
4.1.1	A Indutância	57
4.1.2	O Transformador	61
4.1.2.1	Transformador de Isolamento	61

4.1.2.2	Dimensionamento de Núcleos.....	63
4.1.2.3	Núcleos de Indutâncias.....	65
4.1.2.4	Núcleos de Transformadores	66
4.1.2.5	Modelos de Transformador a Altas-frequências.....	67
4.1.2.6	Escolha do Tipo de Transformador	68
4.1.2.7	Escolha do Material do Núcleo.....	70
4.1.2.8	A Bobinagem: Problemas com as Correntes Induzidas	73
4.1.2.9	O Fio de Litz.....	76
4.2	Optimização no Projecto de um Sistema	78
4.3	Filtragem	79
4.4	Protecções e Segurança	80
4.4.1	Planos de Massa	83
4.4.2	Protecções de Picos e Snubbers.....	83
5	Projecto de Hardware de Controlo.....	85
5.1	Actuação e Controlo no Módulo de Potência.....	85
5.2	Actuação e Controlo da Modulação	88
5.3	Actuação e Controlo na Ligação à Rede	90
5.3.1	A Rede e a Qualidade da Energia Eléctrica	90
5.3.2	A Ligação de Produtores Distribuídos à Rede	92
5.3.2.1	O Fenómeno de Islanding	92
5.3.2.2	Colocação de Energia na Rede.....	96
5.4	Actuação e Controlo do Inversor	97
6	Módulo de Potência.....	101
6.1	Conceptualmente	102
6.2	A Bobine de Potência	105
6.3	O Transformador de Potência	106
6.4	SmarTransformer	108
7	Módulo de Controlo e módulo de Interface e Alimentações	109
7.1	Módulo de interface E Alimentações.....	109
7.1.1	Transformador de Isolamento e Geração de Tensões (Flyback).....	111
7.1.2	Ponte do Secundário.....	111
7.1.3	Ponte do Primário	112
7.1.4	Sensores.....	112
7.1.4.1	Sensor de corrente de saída	112
7.1.4.2	Sensor de tensão de saída.....	112
7.1.4.3	Sensores de temperatura.....	112
7.1.5	Conexões	113

7.2	Módulo de Controlo.....	113
7.2.1	Microcontrolador A.....	114
7.2.2	Microcontrolador B.....	114
8	SoFTWARE.....	115
8.1	Pic-A.....	116
8.1.1	Definições e inclusões de bibliotecas.....	116
8.1.2	Configurações de Oscilador e Frequência de Trabalho.....	117
8.1.3	Inicialização da A/D, Amostragem e Conversão (sem <i>buffer</i>).....	117
8.1.4	Controlo do Primário	118
8.1.5	Controlo do Secundário.....	118
8.1.6	Regulação em <i>loop</i>	118
8.2	PIC-B	119
8.2.1	Definições e inclusões de bibliotecas.....	119
8.2.2	Configurações de Oscilador e Frequência de Trabalho.....	119
8.2.3	Geração das Tensões de Alimentação	120
8.2.4	Regulação em <i>loop</i>	120
9	Testes, Desempenho e Afinação	123
9.1	Testes de Controlo	124
9.2	Afinação.....	124
10	Sugestões e Trabalhos Futuros	127
10.1	Sugestões sobre novas funcionalidades.....	127
10.1.1	<i>Magic Sine Waves</i>	128
10.1.2	Conversores ressonantes e tecnologia planar.....	129
10.1.3	Novos Simuladores, Simulações e Procedimentos de teste	129
11	Referências Bibliográficas	131
11.1	Websites	131
11.2	Textos	132
11.3	Livros	132
12	Anexos.....	135
12.1	Entidades Instaladoras Registadas	135
12.2	Decreto-Lei nº363/2007	144
12.3	Portaria nº201/2008 de 22 de Fevereiro.....	150
12.4	Decreto Legislativo Regional nº16/2008/M	152
12.5	Listagem de Inversores Homologados.....	153
12.6	Esquemas Electrónicos.....	156
12.7	Software (código)	160

ÍNDICE DE FIGURAS

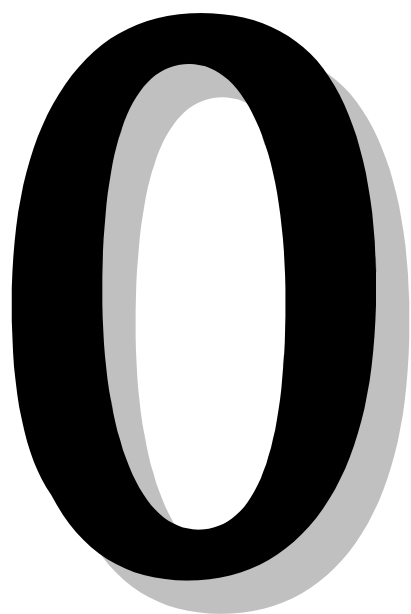
Figura 1: Fontes de Energia Renováveis e o Hidrogénio para armazenamento.....	1
Figura 2: Produção de Energia Eléctrica com base em Energia Geotérmica	1
Figura 3: Esquemático de uma micro-hídrica	1
Figura 4: Funcionamento de um painel (e célula) foto-voltaica.....	1
Figura 5: Sistema geração Eólica doméstico (com carregador de bateria).....	1
Figura 6: Recente geração de micro-aerogeradores	1
Figura 7: Inversor de Potência.....	1
Figura 8: Inversor Convencional (<i>Stand Alone</i>)	1
Figura 9: Inversor <i>Grid-Connected</i> (ainda com baterias).....	1
Figura 10: Inversor (<i>grid-connected</i>) para um sistema eólico	16
Figura 12: Diagrama funcional de um Regulador Linear.....	17
Figura 11: Regulador Linear Genérico	1
Figura 13: Relação tensão/corrente numa indutância.....	19
Figura 14: Indução e Fluxo Magnético no Núcleo de um Transformador (<i>Step-Down</i>).....	1
Figura 15: Transformador de Isolamento	1
Figura 16: Funcionamento Básico de um Transformador.....	21
Figura 17: Circuito com Transformador Usado para Gerar uma Faísca	21
Figura 18: Funcionamento da Modulação PWM num circuito LC.....	23
Figura 19: Sinais de PWM com <i>duty-cycles</i> diferenciados.....	23
Figura 21: Regulador Buck.....	24
Figura 20: Regulador de Comutação.....	1
Figura 22: Corrente na Indutância no Regulador Buck.....	1
Figura 23: Regulador Boost	26
Figura 24: Regulador Buck-Boost (ou Regulador Inversor).....	27
Figura 25: Regulador Flyback de uma única Saída	28
Figura 26: Regulador Flyback com múltiplas saídas	1
Figura 27: Regulador Push-Pull.....	29
Figura 28: Diagrama Temporal de um Regulador Push-Pull.....	1
Figura 29: Regulador de Meia-Ponte.....	31
Figura 30: Diagrama Temporal do Regulador de Meia-Ponte.....	1
Figura 31: Regulador de Ponte-Completa	32
Figura 33: Diagrama de uma Fonte de Alimentação Comutada [Kennedy, 1996, adaptado].....	33
Figura 32: Diagrama Temporal do Regulador de Onda-Completa	1
Figura 34: Geração de Alimentações isoladas com base num Flyback.....	1
Figura 35: Geração de alimentações isoladas, modelo equivalente	34
Figura 36: Campo de indução magnética em função da corrente de magnetização (Histerese no Núcleo) .	1
Figura 37: Classificação das Harmónicas	37
Figura 38: Inversor do ponto de vista Entrada/Saída	1
Figura 40: Inversor Clássico, o Transformador (enorme) trabalha a 50Hz	1
Figura 41: Inversor Comutado (Elevação DC e inversão).....	1
Figura 42: Inversor Comutado com Modulação no Primário.....	1
Figura 43: Modulação baseada em Push-Pull.....	1
Figura 44: Modulação baseada em meia-ponte	1
Figura 45: Modulação baseada em ponte-completa	1
Figura 46: Ponte-completa em ambos os Enrolamentos — Fluxo de Energia Bidireccional.....	41
Figura 47: Ponte-completa em ambos os Enrolamentos — Fluxo de Energia Unidireccional	42
Figura 48: Enrolamento Duplo no Secundário — Fluxo de Energia Unidireccional	43

Figura 49: Simulação da Topologia com Enrolamento Duplo no Secundário.....	44
Figura 50: Esquemático do Circuito utilizado para Simulação da Topologia Proposta	46
Figura 51: Pictograma do IEC TC8	53
Figura 52: Interruptor Externo	54
Figura 53: Bobine Simples.....	1
Figura 55: Modelo de Baixas Frequências para um Transformador Ideal	61
Figura 54: Circuitos que Partilham o Mesmo Fluxo Magnéticos	1
Figura 56: Núcleo em C.....	1
Figura 57: Perdas por Histerese num Núcleo Normal de um Transformador	64
Figura 58: Modelo para Transformador de Baixa-Frequências.....	67
Figura 59: Modelo para Transformador de Alta-Frequências	67
Figura 60: Modelo para Transformador Alta-Frequências com <i>Shield</i>	68
Figura 61: Núcleos Convencionais de Ferrite.....	1
Figura 62: Efeito Pelicular.....	1
Figura 63: Transformador Coaxial	1
Figura 64: Transformador em Tecnologia Planar	70
Figura 65: Proposta para Material do Núcleo (Ferroxcube)	1
Figura 66: Curvas de Histerese e Perdas para o Material Adoptado para o Núcleo.....	72
Figura 67: Correntes Induzidas (Eddy Currents)	73
Figura 68: Efeito Pelicular.....	73
Figura 69: Efeito de Proximidade	1
Figura 71: Resistência Equivalente para um Enrolamento com Várias Camadas	76
Figura 70: Pormenores do Efeito de Proximidade	1
Figura 72: Tipos de Fio de Litz I	77
Figura 73: Tipos de Fio de Litz II	77
Figura 74: Filtragem da Tensão de Entrada	80
Figura 75: Características Típicas de Sobre-tensões nas Redes Eléctricas [Séraudie, 1999].....	81
Figura 76: Suavização de Oscilações com Recurso a <i>Snubber</i>	83
Figura 77: Sistema de Geração de Sinais para Actuação nos Transístores de Comutação (no Primário)....	86
Figura 78: Protecção por <i>Hardware</i>	87
Figura 79: Controlo do Inversor (Modo Corrente/Modo Tensão).....	88
Figura 80: Ideias sobre o Futuro da Rede Eléctrica	92
Figura 81: Mecanismos <i>anti-islanding</i>	94
Figura 82: Mecanismos para Lidar com o <i>Islanding</i>	95
Figura 83: A Inserção de Energia na Rede Eléctrica (Situação Genérica).....	96
Figura 84: Sugestão de Controlo do Inversor I.....	97
Figura 85: Sugestão de Controlo do Inversor II	98
Figura 86: Sistema Proposto (Circuito do Módulo de Potência Simplificado).....	102
Figura 87: Diagrama de Alto Nível do <i>Hardware</i>	1
Figura 88: Primário PCB	104
Figura 89: Fabrico da Bobine de Filtragem	105
Figura 90: Suporte do Núcleo ETD59	106
Figura 91: Bobinagem do Secundário – enrolamento grosso.....	106
Figura 92: Bobinagem do Secundário – enrolamento fino	107
Figura 93: Isolamentos entre Secundário e Primário	107
Figura 94: Bobinagem do Primário.....	107
Figura 95: Esquema Detalhado dos Componentes do SmarTrasnformer.....	108
Figura 96: Diagrama da Placa de Interface	1
Figura 97: Esquema de Alimentações do Sistema	1
Figura 98: Esquema do Transformador de Isolamento Galvânico e Geração de Tensões (Flyback).....	111
Figura 99: PIC24 da Microchip.....	1

Figura 100: Diagrama da Placa de Controlo	114
Figura 101: Procedimento de teste de controlo (<i>stand alone</i>)	124
Figura 102: Tensão DC na Saída em Função do <i>duty-cycle</i> na Ponte do Primário	125
Figura 103: Aspecto dos pulsos de geração de uma <i>magic sine wave</i>	128
Figura 104: Ideia sobre conversores ressonantes.....	129
Figura 105: <i>Layout</i> da Placa de Potência	156
Figura 106: Esquemas Eléctricos da Placa de Potência	157
Figura 107: <i>Layout</i> da Placa de <i>Interface</i>	157
Figura 108: Esquemas Eléctricos da Placa de <i>Interface</i>	158
Figura 109: <i>Layout</i> da Placa de Controlo	159
Figura 110: Esquemas Eléctricos da Placa de Controlo.....	160

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre Algumas Tecnologias de Geração Distribuída [EDP, 2006].....	11
Tabela 2: Comparação entre Fontes de Potência Comutadas	36
Tabela 3: Estatística Microprodução 1.....	52
Tabela 4: Estatística Microprodução 2.....	52
Tabela 5: Estatística Microprodução 3.....	52
Tabela 6: Fórmulas Usuais para Cálculo Teórico a Indutância de Algumas Construções de Bobines	60
Tabela 7: Classificação de Interrupções (quanto à Duração) na Distribuição de Energia [EDP, 2006]	90
Tabela 8: Conexão entre o Módulo de Potência e o Módulo de Interface	113
Tabela 9: Entidades Instaladoras registadas.....	143
Tabela 10: Listagem de Inversores Homologados	156



INTRODUÇÃO

A energia. A história da energia está associada à modernização das sociedades, à possibilidade de comunicação entre comunidades geograficamente separadas, à intensidade da circulação de pessoas e mercadorias, a novos modos de organizar o espaço privado e o espaço público, à impregnação da tecnologia no quotidiano e ao despertar da consciência ecológica e social. O carvão, a electricidade, o petróleo, as energias renováveis, a energia nuclear e outros recursos transformaram os equilíbrios das nações, das empresas e das famílias. A sociedade tecnológica nasce no final do séc. XIX, com a descoberta da electricidade (ou da lâmpada eléctrica) e desde aí, a nossa espécie como civilização conheceu o seu maior florescimento e progresso em todos os níveis: economia, ciência, cultura, demografia, salubridade.

Actualmente, começamos a ser desafiados pela escassez dos combustíveis fósseis (grandes impulsionadores da I revolução industrial) e tentados pela busca de energias mais limpas, mais baratas e mais massificadas a partir de outras fontes, quer pela pressão da consciência ecológica humana, quer pela pressão económica da insustentabilidade do crescimento energético.

A electricidade é o elo mais fraco do capitalismo industrial e da sua extensão digital. A própria revolução tecnológica associada à Terceira Vaga desde os anos 70 e à Nova Economia mais recente apenas acelerou a dependência de todo o sistema económico e modo de vida em relação à electricidade. E será por este calcanhar de Aquiles que o sistema sofrerá um dos abalos estruturais mais profundos quando se generalizar uma "epidemia" de cortes de electricidade nas redes eléctricas à escala global. "Apagões", que poderão tornar-se o pão-nosso de cada dia nas décadas de 10 e 20 deste século, terminando num queda abrupta do uso de energia per capita, que regressaria aos níveis de 1930.

In "Population and Environment", de Richard Duncan presidente do Institute on Energy and Man (Seattle, EUA)

A tese central de Richard Duncan é que o coração do estilo de vida contemporâneo é centrado no que ele denomina de "3 C" (comunicações, computação, controlo), e que tudo isso depende, em última análise, do simples interruptor de luz na parede!

0.1 CONTEXTO E ENQUADRAMENTO DO TRABALHO

A presente dissertação destina-se à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, pelo Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática¹ da Universidade de Aveiro².

Os actuais (e provavelmente futuros) altos preços do petróleo e gás natural tornaram mais competitivas as tecnologias de criação de energia eléctrica não baseadas em combustíveis fósseis. Em Portugal, no curto/médio prazo, a energia eólica é claramente aquela que se apresenta em melhores condições para ser rentável e por consequência é alvo de um forte investimento tanto do sector privado como público. Espera-se inclusivamente que se forme o designado "cluster eólico" que colocará o país na vanguarda da sua utilização, assim como no domínio das tecnologias que a suportam (projecto e fabrico de torres, hélices, geradores e sistemas eléctrico/electrónicos associados).

Se os grandes sistemas têm alternadores ligados directamente à rede eléctrica, no caso dos sistemas para fins domésticos (até alguns kW) tal não acontece: a velocidade de rotação depende da velocidade do vento, pelo que o gerador, que é tipicamente um alternador optimizado para funcionar a baixas rotações, gera electricidade com tensão e frequência variável que impossibilitam a sua ligação directa à rede. Na esmagadora maioria dos casos a solução passa pela rectificação (normalmente realizada logo no alternador) e filtragem obtendo-se uma tensão contínua (que opcionalmente pode ser armazenada numa bateria), que é convertida para as especificações da rede eléctrica portuguesa: 230Vrms @ 50Hz. Esta é a função dos inversores.

0.2 MOTIVAÇÃO

A motivação principal da realização deste trabalho resulta da crescente necessidade de adopção de novas formas de produção de electricidade sem recurso aos fornecedores tradicionais a curto prazo, isto é, maneiras imediatas de suavizar a conta energética do ponto de vista doméstico.

Há ainda que referir, a procura cada vez maior de fontes de energia não poluentes a médio prazo para as mais variadas aplicações, antes consideradas tradicionalmente indissociáveis dos combustíveis "sujos" (motores automóveis, centrais de aquecimento, etc.). Procura essa, que cada vez atrai mais fundos quer para investigação, desenvolvimento e implementação, com vista à rentabilidade.

A longo prazo, a incessante contestação aos efeitos ecológicos nefastos do uso desregulado dos combustíveis fósseis, começa a pesar fortemente na mentalidade individual e na opinião pública, o que tem fomentado sem paralelo o investimento e a procura de novas soluções sustentadas de produção energética de pequena escala e fácil massificação e execução.

¹ <http://www.deti.ua.pt/>

² <http://www.ua.pt/>

0.3 OBJECTIVOS

O projecto efectuado no âmbito desta dissertação tem como objectivo último implementar o protótipo de um inversor *true-sinewave* de 1 kW para ser conectado à rede eléctrica e com uma gama de tensões de entrada superior a 18 V. Deve ser realizado tendo já em vista o futuro: não só a optimização para entrada de 24 V, mas também entrada de 48 V.

Para chegar à finalidade proposta acima, estão em seguida descritos os objectivos essenciais:

- Estudos da situação actual relevantes:
 - Estado da arte em produção de energia a nível doméstico;
 - Estado da arte em sistemas eólicos e sistemas eólicos domésticos;
 - Estado da arte em inversores *true-sinewave*, inversores *grid-connected*.
- A conclusão do projecto de todos os circuitos, projecto esse iniciado no ano anterior³;
- Montagem e fabrico de todo o sistema;
- *Design* de *software* de controlo para os módulos de potência, *interface* e microcontrolo do inversor completo proposto;
 - Testagem, afinação e aferição de comportamentos do sistema integralmente;
 - Discussões, conclusões e sugestões para um aperfeiçoamento futuro.

0.4 METODOLOGIA

Numa primeira parte do trabalho, foi feito um estudo profundo sobre os assuntos referidos em 0.3 OBJECTIVOS contextualizando o autor nos devidos assuntos teóricos necessários à execução do plano proposto.

Seguidamente, com vista à conclusão do *design* total do sistema, o autor debruçou-se sobre o trabalho, estudo e projecto já efectuado pelo predecessor em que esta tese tem origem³. Recorrendo então a *software* especializado de projecto, simulação e implementação de circuitos digitais como *Cadence OrCAD v16.0**, *PSpice v9.1**, *MATLAB v7.6*.

Com o acordo sobre todo o *hardware* a implementar alcançado, passou-se à fase de estudo e *debugging* (no que já havia montado do ano transacto), e posterior montagem e síntese dos componentes em falta, dos componentes novos projectados e correcção de eventuais erros de *design* e *assembling* anteriores.

Na fase de síntese e produção de *software* adequado à solução física alcançada, recorreu-se a ferramentas disponibilizadas pela *Microchip*⁷: Para os microcontroladores *PIC24F* usados, *kit* de desenvolvimento *16-BIT 28P STARTER DEMO BOARD*, *Microchip Development Tools* e o conector *MPLAB ICD 2 LE, In-Circuit Debugger*.

Numa última fase, sujeitou-se todo o sistema a uma série de testes físicos com vista a documentação de todo o seu comportamento, possíveis *upgrades* e eventuais erros e limitações com vista a caminhos de trabalho futuros.

³ v. Projecto Inversor, Hardware de Ricardo J. S. Matias, 2007, IEETA-UA

⁴ <http://www.cadence.com/>

⁵ <http://www.pspice.com/>

⁶ <http://www.mathworks.com/>

⁷ <http://www.microchip.com/>

0.5 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O **capítulo 0** presente é uma apresentação breve da tese de dissertação e do trabalho proposto para mestrado.

O **capítulo 1** faz o ponto da situação em relação às tecnologias viáveis de geração distribuída, ou seja, de soluções ecologicamente pensadas para microgeração de energia eléctrica de pequena escala doméstica, bem como uma comparação entre as diversas propostas tecnológicas com especial enfoque nas soluções eólicas.

O **capítulo 2** introduz vários conceitos de electrónica de potência, como o transformador, regulador, fonte e comutação. Explica ainda o que é um inversor e as diversas aproximações gerais ao dispositivo central da presente tese.

O **capítulo 3** sumariza o estado actual de regulamentação e normalização de Inversores para Microgeração em Portugal.

O **capítulo 4** é o aprofundar de assuntos nucleares para um projecto eficiente na área de electrónica de potência, particularmente um inversor. Menciona também muitas noções indispensáveis de electromagnetismo. Aborda ainda assuntos de natureza prática, descrevendo e aconselhando distintas soluções tecnológicas para variadíssimos pormenores necessários: bobinagem, cablagem, núcleos, protecções, etc.

O **capítulo 5** centra-se na área de controlo, propondo alternativas para a actuação nos vários componentes do sistema total e dando particular atenção à rede eléctrica.

O **capítulo 6** apresenta a decisão de implementação de todo o módulo de potência do sistema.

O **capítulo 7** explica a proposta para o módulo de *interface* do inversor, isto é, a parte do sistema que rege a comunicação entre o controlo (microprocessadores) e a parte de potência.

O **capítulo 8** exhibe o pequeno módulo de controlo de todo o sistema, falando da escolha e das funcionalidades mais pormenorizadamente dos microprocessadores escolhidos.

O **capítulo 9** demonstra o *software* produzido para os microcontroladores, explicando o que faz o código de actuação no sistema.

O **capítulo 10** destina-se a comprovar o desempenho total do sistema, com uma bateria de testes, resultados e aferições incidentes no trabalho desenvolvido.

O **capítulo 11** é o capítulo onde se expõe as conclusões, se constata possíveis melhoramentos e limitações de todo o projecto e se sugere caminhos evolutivos para trabalhos futuros de desenvolvimento, actualização e aperfeiçoamento do dispositivo fabricado.

O **capítulo 12** refere fontes bibliográficas relevantes na feitura de todo o trabalho e dissertação.

O **capítulo 13** contém apêndices técnicos com material importante de apoio ao presente texto: esquemáticos electrónicos, *datasheets*, código de *software*, etc.

1

GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉCTRICA

Como é natural, apenas se focará a produção de energia a (nível doméstico⁸) por via de fontes de energia renováveis. Também se diferencia neste estudo introdutório os sistemas em que o *output* é efectivamente energia eléctrica, ou seja, a microgeração. Sistemas que aproveitam energia (mesmo que de fontes renováveis) para reconversão noutro tipo de energia que não a electricidade⁹ (por exemplo, energia térmica ou luminosa) não serão considerados, dado o baixo interesse (comparativo) para o caso concreto do inversor *grid-connected* proposto. Assim, focaremos o estudo nos sistemas de produção de energia eléctrica (a nível doméstico) com base em energia geotérmica (para produção de electricidade e não com fins de regulamento térmico de ar ou água), solar (baseada em sistemas foto-voltaicos),

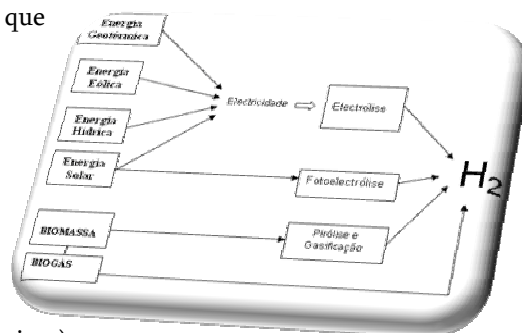


Figura 1: Fontes de Energia Renováveis e o Hidrogénio para armazenamento

⁸ “Produção de Energia a Nível Doméstico” ou também chamada “Geração Distribuída” ou “Microgeração”.

⁹ Despreza-se: sistemas de biomassa (combustão), cogeração (biomassa e electricidade) por ser uma tecnologia para já não adaptável ao uso doméstico. Despreza-se ainda as pilhas de Hidrogénio, pois não são um processo de produção energética propriamente dita.

hídrica e claro, eólica.

Ao nível doméstico e em locais remotos, é comum produzir energia eléctrica através de fontes alternativas. No entanto, pelo facto dos sistemas de produção serem autónomos, exigem que o utilizador tenha que gerir a relação capacidade de produção/consumo. Isso implica mais capacidade de produção, sistemas redundantes (por exemplo, gerador de emergência) e/ou sistemas de armazenamento. Tudo isto torna estas soluções caras e complexas.

1.1 ENERGIA GEOTÉRMICA

A produção de electricidade com base em energia geotérmica a baixa escala está a dar os primeiros passos actualmente. Embora se produza energia eléctrica deste modo há mais de um século e haja centrais geotérmicas um pouco por todo o mundo, só há muito pouco tempo se começou a adaptar o mesmo princípio de funcionamento à pequena escala doméstica.

A dita aplicação doméstica segue exactamente os mesmos princípios que a escala industrial: perfura-se suficientemente fundo para aproveitar o calor termal existente nas camadas interiores da Terra para aquecer gás, ou líquido (ascende por ebulição geotermal) que fará (à superfície) girar as pás, lâminas ou turbinas que por sua vez transformam a energia

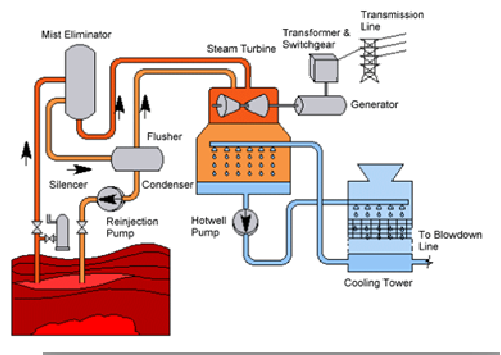


Figura 2: Produção de Energia Eléctrica com base em Energia Geotérmica

mecânica em electricidade no gerador.[4]

1.1.1 Desvantagens da Energia Geotérmica na Produção Doméstica

As desvantagens de usar este tipo de implementação, são várias. A mais evidente, é a geografia: nem todas as casas estão num sítio propício ao aproveitamento geotérmico¹⁰, pelo que a localização é impossível de descurar.

Economicamente, este sistema (e obviamente dependendo da localização) ainda não é atractivo mesmo em bons *spots* geotérmicos: tem um custo inicial elevado, e a barata manutenção da bomba de sucção de calor (que por estar situada no interior da Terra ou dentro de um edifício não está exposta ao mau tempo e a vandalismo), é contrabalançada pelo elevado custo de manutenção dos canos (onde a água causa corrosão e depósitos minerais).

Também o impacto ambiental não é tão reduzido como uma fonte verde faria supor: o risco de subsidência de terras a médio/longo prazo na zona de exploração geotérmica não é irrelevante, o que a verificar-se seria catastrófico. Actualmente os anti-congelantes para tubagens e canos usados nas zonas mais frias são poluentes apesar de terem uma baixa toxicidade, alguns produzem CFCs e HCFCs. Ainda, há que considerar a presença de vapores de escape¹¹: os fluxos de água geotérmicos contêm gases

¹⁰ Nota: Este factor (localização) é preponderante em todas as soluções com base em energias renováveis, no entanto é referido na geotérmica, porque na realidade, os pontos de bom aproveitamento geotérmico são muito menos comuns comparativamente às outras energias renováveis (hídrica, solar, eólica, etc.)

¹¹ Por exemplo o ácido sulfídrico (H_2S) gasoso: corrosivo, de cheiro intenso, nocivo para a saúde.

dissolvidos, sendo que estes gases são enviados para o gerador e acabam inevitavelmente por ser expelidos para a atmosfera.

1.1.2 Vantagens da Energia Geotérmica na Produção Doméstica

As vantagens desta resolução são a produção quase constante de energia, visto ser uma fonte extremamente estável (não há variações significativas da temperatura interior ao longo do dia ou das estações), e o processo em si (electricidade produzida por força motriz de hélices mecânicas) é usado desde o início da história da energia eléctrica, logo o mais simples, mais estudado e mais barato de construir.

Mas a maior vantagem face às suas congéneres renováveis, é o tamanho de todo o sistema. Toda a microcentral (que é de pequena dimensão) e as tubagens estão situadas no interior da Terra ou dentro de um edifício não estando por conseguinte expostos, o que acarreta fortes efeitos positivos paisagísticos, arquitectónicos e urbanos.

1.2 ENERGIA HÍDRICA

Em grande escala a hidroelectricidade é, das fontes de energia renováveis, a mais antiga em Portugal e a mais implantada. Ultimamente tem-se visto um proliferar de mini-hídricas construídas por autarquias de todo o país.

O funcionamento é simples: através de pequenos açudes, diques ou barragens (ou desvios como na Figura 3) parte do caudal natural (do rio, ribeira, queda de água ou curso de água suficiente para a microhídrica) é dirigido e canalizado para

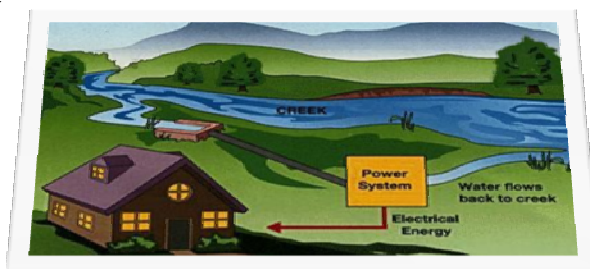


Figura 3: Esquemático de uma micro-hídrica

um sistema de turbinas que transformam a força motriz em electricidade.

1.2.1 Desvantagens da Energia Hídrica na Produção Doméstica

A localização (tal como na energia geotérmica) é de novo um factor preponderante: nem todos possuem as condições à porta de casa para aplicabilidade de uma microhídrica. A produção está apenas sujeita à variação de caudal que é praticamente constante ao longo do dia (isto é, em curtos períodos de tempo), mas que pode variar significativamente ao longo das diferentes estações do ano, pois fala-se cursos de água de pequena e média dimensão, que como se sabe, estão fortemente condicionados por abundância/escassez de chuva.

O impacto ambiental na fauna e flora locais do desvio (que pode não ser mínimo em curso de água naturalmente estreitos) podem ser sentidos se o processo de implementação da microhídrica não for devidamente estudado e acompanhado. Ainda, pode não ser esteticamente apelativo (por exemplo) possuir uma queda de água perto de casa, um riacho ou um ribeiro, que pela construção serão lesados, o que poderá não só interferir com a biosfera local, mas com implicações para terceiros a jusante da via de água.

1.2.2 Vantagens da Energia Hídrica na Produção Doméstica

Em muitas situações, reestruturar um moinho de água ou uma azenha para uma microhídrica é relativamente barato, simples e sem efeitos ambientais (dada a construção já existir há algum tempo). O nosso país possui uma morfologia bastante acidentada¹² e é hidricamente muito rico, especialmente o interior centro e norte.

1.3 ENERGIA SOLAR — FOTOVOLTAICA

Os sistemas foto-voltaicos são os mais fortemente implementados ao nível da microgeração, devido aos seus “primos” foto-térmicos (painéis solares para aquecimento de ar ou água) há muito massificados nos países desenvolvidos.

A energia solar pode ser directamente convertida em energia eléctrica por intermédio das células fotovoltaicas: quando a célula solar fica exposta ao sol, os electrões libertam-se do seu núcleo deslocando-se e movendo-se para a superfície da placa solar. As duas extremidades da célula solar estão ligadas por um fio condutor eléctrico e com o movimento dos electrões gera uma corrente eléctrica.

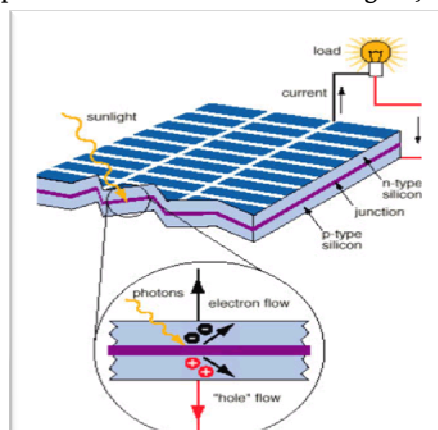


Figura 4: Funcionamento de um painel (e célula) fotovoltaica

1.3.1 Desvantagens da Energia Solar na Produção Doméstica

A grande desvantagem destes sistemas é a eficiência energética: é difícil e dispendioso (tecnologia actual) chegar a valores próximos de 20%¹³. Embora os raios solares cheguem a todo o lado e a nossa latitude amena não seja proibitiva (mais desvantajosa no norte), se pensarmos que o sistema apenas funciona durante o dia e que temos ainda de levar em conta a nebulosidade, temos de contar com fortes oscilações na produção ao longo do dia, ou seja, em curtos períodos de tempo.

Economicamente; o ciclo de vida de um painel foto-voltaico ronda os 4 anos, logo a manutenção do sistema é um factor que tem de se ter em conta, quando comparamos com os outros sistemas. Ainda o investimento inicial é avultado, dado que a tecnologia utilizada é muito sofisticada e cara.

1.3.2 Vantagens da Energia Solar na Produção Doméstica

Não é preciso hoje em dia soluções muito criativas a nível arquitectónico para integrar grandes áreas de painéis foto-voltaicos em fachadas ou telhados, e dados os últimos avanços na área¹⁴, cada vez mais assistimos a integrações perfeitas quer no ambiente urbano quer rural dos painéis. Além disto é dos sistemas com menos impacto a nível ecológico.¹⁵

¹² Por exemplo o solo vai de uma altitude de quase 2000m (Penhas Douradas) ao nível do mar em menos de 100Km

¹³ O limite teórico máximo numa célula de silício cristalino é de 28%.

¹⁴ Silício com colorações e texturas personalizáveis por exemplo.

¹⁵ Os malefícios das paredes espelhadas (em casas e edifícios) ainda não foram totalmente comprovados.

Ainda a possibilidade simples de implementação faz desta solução a indicada para locais remotos, com deficiência ou inexistência de abastecimento da rede eléctrica.

1.4 ENERGIA EÓLICA

O vento tem origem nas diferenças de pressão causadas pelo aquecimento diferencial da superfície terrestre, sendo influenciado por efeitos locais, como a orografia e a rugosidade do solo. Assim, o potencial energético a ele associado, varia não só em função das condições meteorológicas (intensidade e direcção) mas também do local. A energia eólica¹⁶ já é utilizada há muitas centenas de anos como a forma de energia mais barata e também menos poluente; contudo, abundância de petróleo que surgiu no fim da Segunda Guerra Mundial fez regredir muitíssimo a sua utilização.[6]

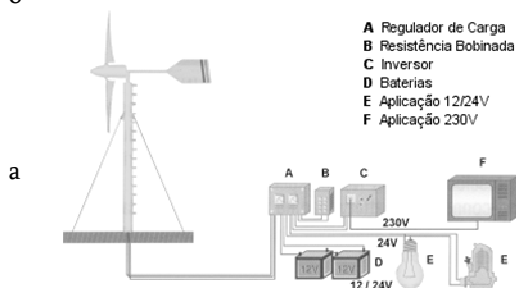


Figura 5: Sistema geração Eólica doméstico (com carregador de bateria)

Existem, basicamente, dois tipos de turbinas eólicas modernas:

- Sistemas de eixo horizontal, os mais conhecidos. Consistem numa estrutura sólida elevada, tipo torre, com duas ou três pás aerodinâmicas que podem ser orientadas de acordo com a direcção do vento;
- Sistemas de eixo vertical são menos comuns, mas apresentam a vantagem de captarem vento de qualquer direcção, sem ajustamento.



Figura 6: Recente geração de micro-aerogeradores

1.4.1 Desvantagens da Energia Eólica na Produção Doméstica

A desvantagem preponderante prende-se com o impacto ambiental do aerogerador: o ruído, o impacto visual e a influência na avifauna¹⁷.

A nível técnico, as dificuldades são, a inconstância do vento que não sopra sempre com a mesma intensidade (ao longo do ano, do dia e até das horas) e a existência de um limiar abaixo do qual não há força motriz suficiente para gerar energia eléctrica.

Do ponto de vista benefício/custos, há que referir que os locais com regime de vento muito favorável encontram-se em montanhas e em zonas remotas. Daí que coincidam, em geral com zonas servidas por redes eléctricas antigas e com fraca capacidade, dificultando o escoamento da energia produzida. As soluções imediatas para o problema passam pela construção de linhas muito extensas, cujos custos tornam os projectos pouco atractivos.

¹⁶ Eólica, de Eolos, deus grego do vento.

¹⁷ Recentes estudos sistemáticos demonstram ser exagerados os receios ecológicos anunciados: quer através da consciencialização dos promotores para os cuidados a adoptar, mormente na fase de construção, quer ainda pelas inovações tecnológicas que vão sendo incorporadas (perfis aerodinâmicos mais evoluídos, novos conceitos de regulação, máquinas de maior potência permitindo reduzir o número de unidades a instalar, etc.), a evolução é, claramente, no sentido da crescente compatibilização ambiental da tecnologia.

1.4.2 Vantagens da Energia Eólica na Produção Doméstica

Economicamente, esta é uma solução muito vantajosa: o custo de manutenção destes sistemas é muito baixo, bem como o investimento inicial comparativamente é dos mais reduzidos. Além disso, Portugal tem condições bastante favoráveis ao aproveitamento da energia eólica.

É um domínio de investimento fortíssimo, o que se traduz em muitos avanços na tecnologia a aplicar e no abaixamento de preços resultante da normal multiplicação de soluções e produção em larga escala de componentes electrónicos e mecânicos da área. Uma outra possibilidade de aproveitamento da energia eólica consiste nos parques *offshore*, instalados ao largo da costa marítima, de modo a tirar partido dos ventos fortes que caracterizam esta zona.¹⁸

1.5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: COMPARAÇÃO

Geração distribuída de energia é a designação da EDP¹⁹ dada à microgeração, produção de energia eléctrica a nível doméstico.

As necessidades crescentes de energia eléctrica com elevada qualidade e de diversificação de fontes energéticas, bem como as restrições ao nível de emissões de poluentes, têm fomentado o desenvolvimento de novas tecnologias de GD. Algumas destas tecnologias assentam no aperfeiçoamento de sistemas já em exploração, como os motores de combustão interna e os motores stirling, mas também em tecnologias completamente inovadoras, como as células de combustível alimentadas a hidrogénio, gás natural, gasolina, etc. É expectável que estas tecnologias satisfaçam algumas das novas exigências do sector. Tecnologias como as micro-turbinas ou as células de combustível poderão contribuir para a melhoria da QEE ao nível das instalações do Cliente.

In “Manual de Qualidade da Energia Eléctrica”, Fonte: EDP

Nem sempre os sistemas de geração de emergência têm a capacidade de resposta às perturbações de tensão que se verificam nas redes de transporte e distribuição de energia. A solução ideal deve incluir recursos que respondam eficazmente às variações de carga e que mantenham as características da tensão de alimentação em conformidade com as necessidades de qualidade de energia eléctrica.[4]

¹⁸ Infelizmente, embora Portugal tenha uma ampla costa marítima, não reúne as melhores condições para este tipo de parque eólico, já que o mar é muito profundo a poucos metros da costa, o que dificultaria a implementação dos aerogeradores.

¹⁹ EDP: Energias de Portugal, maior empresa de distribuição de energia eléctrica em Portugal.

A tabela que se segue apresenta alguns dados comparativos entre as tecnologias de geração distribuída com maior potencial de aplicação na área da qualidade da energia eléctrica.

	Motor de Combustão Interna	Micro-turbina	Célula de Combustível
Gama de potências (kW)	0,05 a 60.000	20 a 500	0,5 a 10.000
Rendimento eléctrico (%)	25 – 45	20 – 30	30 – 50
Capacidade de seguimento de carga	Muito boa	Razoável ^(b)	Muito boa
Tempo de arranque	10 s – 15 min	60 s	^(a)
Disponibilidade (%)	90 – 98	90 - 98	90 - 95
Intervalos entre paragens para manutenção (x1000 horas)	0,5 – 2	5 - 8	10 – 40
Tempo de vida útil (anos)	20 – 30	18	20 ^(c)
Custos de aquisição (€/kW)	300 – 900	700 - 1100	> 4000
Custos de O&M (€/kWh)	0,005 – 0,015	0,005 – 0,016 ^(c)	0,005 – 0,030 ^(c)
Custos da energia (€/kWh)	0,07 – 0,15	0,05 – 0,15	> 0,15 ^(c)
Disponibilidade comercial	Elevada	Moderada	Baixa

Tabela 1: Comparação entre Algumas Tecnologias de Geração Distribuída [EDP, 2006]

(a) Informação não disponível.

(b) Apesar do elevado potencial de seguimento de carga, os modelos actuais ainda não apresentam bons desempenhos a este nível.

(c) Valor estimado.

Como a tabela confirma, o microaerogerador (a única fonte de energia renovável na comparação) é uma solução mais que atractiva neste momento, embora o rendimento apresentado não seja para os resultados da nova geração de arquitecturas de hélices domésticas e tecnologias de inversores na qual este projecto se insere.

A eficiência energética estimada para o presente trabalho excede a prevista pela EDP.

2

INVERSORES

A corrente alternada — do inglês *Alternate Current*, AC — difere da corrente contínua (do inglês *Direct Current*, DC que é o fluxo constante e ordenado de electrões sempre numa direcção) é uma corrente eléctrica cuja amplitude e direcção da corrente varia ciclicamente. A forma de onda usual num circuito AC é sinusoidal por ser a forma de transmissão de energia mais eficiente.

A corrente alternada surgiu quando Nicolas Tesla²⁰ foi contratado por George Westinghouse²¹ para construir uma linha de transmissão entre Niágara e Búfalo, em NY. Thomas Edison²² fez o possível para desacreditar Tesla, mas o sistema polifásico de Tesla foi adoptado. A corrente alternada é a forma mais eficaz de se transmitir uma corrente eléctrica por longas distâncias.

²⁰ Engenheiro electrotécnico, físico e inventor sérvio radicado nos EUA. Inventor da bobine de Tesla e dos circuitos trifásicos (usados na distribuição de energia eléctrica). A unidade de medida de densidade de fluxo magnético é o *Tesla*.

²¹ Empresário e engenheiro norte-americano. Foi um dos pioneiros da indústria da electricidade.

²² Inventor e empresário norte-americano que desenvolveu importantes dispositivos de interesse industrial: a lâmpada eléctrica incandescente, o gramofone, o cinescópio, o microfone de grânulos de carvão para o telefone, etc.

2.1 CONCEITO DE INVERSOR

Genericamente, um inversor faz o oposto de um rectificador.²³ A conversão de energia eléctrica para uso doméstico é apenas uma das suas aplicações:

- Computadores, dispositivos portáteis e *notebooks*;
- Automação Industrial;
- Equipamentos médicos;
- Fax e equipamentos de comunicação;
- Luz de Emergência;
- Equipamentos musicais;
- *Camping* e lazer (portabilidade de fontes de potência);
- O controlo de potência em motores e geradores eléctricos é muitas vezes baseado em inversores;²⁴

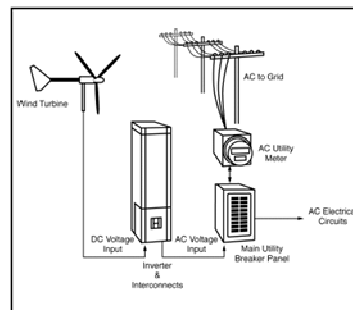


Figura 7: Inversor de Potência

É o dispositivo que transforma energia eléctrica na forma normalizada da rede²⁵. O nome inversor vem do facto do circuito gerador da forma de onda de saída inverter a polaridade de uma tensão interna para gerar uma tensão alternada. A solução desenvolvida, transforma 24VDC em 230VAC.

2.1.1 Inversor *Stand-Alone*

A tecnologia comercial de inversores mais comum é a de inversores a funcionar "sozinhos", ou em modo autónomo: são os inversores para baixa potência, normalmente para algumas centenas de *Watt* no máximo, são baratos e bastante simples.

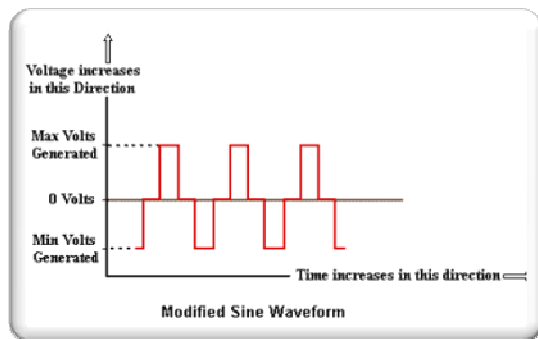


Figura 8: Inversor Convencional (*Stand Alone*)

Em muitos dos casos, o *output* é uma sinusóide aproximada por uma onda quadrada. É por esta forte limitação (como ilustra a figura), que não é possível alimentar qualquer tipo de carga, isto é, a maior parte dos aparelhos que requerem uma potência significativa para funcionar, solicitam-na "exigindo" uma forma de onda sinusoidal quase perfeita, descartando este tipo de alimentação. É inviável para incorporação da rede energética e inconciliável com o conceito de produção doméstica.[15]

É comum necessitarem de uma entrada regulada e desligarem quando a tensão de entrada baixa de um determinado valor. Estão só e normalmente projectados para ser atacados por um sistema de armazenamento baseado em baterias e fornecer aparelhos portáteis de baixo consumo médio, como por exemplo notebook, fax (no carro) e arranque de certos tipos de motores e rotores AC, pois conseguem gerar consideráveis picos de tensão.

A baixa eficiência é compensada pelo baixo custo desta topologia.

²³ Um circuito rectificador é aquele que transforma um sinal de corrente alternada em corrente contínua, ou seja, impede que haja mudança de sentido de fluxo de corrente eléctrica.

²⁴ Repare-se no caso dos veículos com motores de combustão interna auxiliados por motores eléctricos (veículos híbridos). Neste caso "conversor" é talvez um termo mais genérico e adequado aos dispositivos electrónicos usados para esse fim.

²⁵ Em Portugal: 230VAC @ 50 Hz.

2.1.2 Inversor *Grid-Connected* (ou *Grid-Tie*)

Um inversor *grid-connected* é um inversor que se liga numa rede partilhada de energia eléctrica. O inversor é assim ligado à rede como uma carga activa, que fornece energia e que alivia o consumo de energia por parte do fornecedor público.²⁶ Inversores para ligar à rede devem ser *true-sinewave* e têm de controlar tanto a tensão como a corrente de saída e a energia que retiram da fonte. O procedimento será maximizar a energia retirada do meio de captação de energia renovável, maximizando assim a eficiência de todo o sistema. Têm que garantir estar sincronizados com a rede, querendo isto dizer que trabalham em fase e com a mesma frequência. São muito mais caros, (pela sua eficiência, fiabilidade e versatilidade) e difíceis de projectar e construir com sucesso.[10]

Foi a partir da introdução (a nível particular) destes dispositivos que se tornou possível aos indivíduos com excesso de produção de energia, vende-la à rede, criando a expressão conhecida no meio da nova geração de microprodutores como *spinning the meter backwards*.²⁷ Tornando também desnecessário a inclusão de baterias no sistema, já que o excesso de energia deixa de ser armazenado para ser injectado imediatamente na rede.

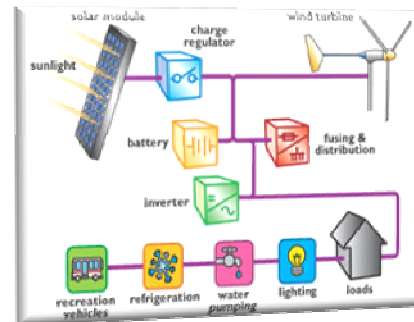


Figura 9: Inversor *Grid-Connected* (ainda com baterias)

Os sistemas comerciais mais conhecidos trabalham com *inputs* de 12 ou 24 *Volt*, e o *output* além da especificação de sincronização com a rede, tem ainda um outro importante parâmetro a cumprir: a tensão (de saída) necessita ser ajustável, tendo de ser na maior parte do tempo ligeiramente superior à tensão na rede, para permitir que entre corrente (na rede). Este processo é feito através do controlo e monitorização da própria rede (por parte do inversor) e ajustando a tensão de saída ou o *duty-cycle* no primário do transformador²⁸.

2.1.3 Inversor com saída *True-Sinewave* (ou *Pure-Sinewave*)

Também conhecidos como inversores síncronos, caracterizam-se por conseguirem pôr à saída uma onda de corrente eléctrica AC sinusoidal, muito mais eficiente. Distinguem-se pois a sua saída foi como que “suavizada” em relação aos inversores simplistas e de baixa eficiência.

É absolutamente necessário para se poder conectar o sistema de produção de energia doméstico a fortes cargas e à rede pública de distribuição de energia eléctrica: conceito de *Net Metering*²⁹ pois a sinusóide fornecida pela empresa distribuidora é uma sinusóide pura, tal como a saída deste tipo de inversores. É a substituição das obsoletas e poluentes baterias pela rede eléctrica que conceptualmente desempenha agora esse papel.

São os inversores usados nos grandes aerogeradores, e podem ser projectados para potências desde as centenas de Watt até aos 200.000 W³⁰.

²⁶ Se este sistema fosse usado em larga escala modificaria as estatísticas de consumo do ponto de vista da rede pública. Do ponto de vista do utilizador baixaria o valor da factura no final do mês.

²⁷ “Fazer o contador andar para trás!” (Tradução livre)

²⁸ Tratar-se-à mais adiante destas questões técnicas intrínsecas do inversor proposto: *duty-cycle*, transformadores, etc.

²⁹ Conceito legislado recentemente em Portugal que permite ao consumidor, produzir e injectar electricidade na rede pública.

³⁰ Suficiente para abastecer uma pequena vila.

2.2 INVERSORES PARA EÓLICA VS. SOLAR

As soluções e implementações de inversores são normalmente específicas, variando com determinado tipo de fonte de entrada. Soluções *grid-connected* para painéis solares são mais comuns de encontrar do que para geradores eólicos.

É de suspeitar³¹ que, devido às células fotovoltaicas possuírem características V-I simples (dinâmica electroquímica simples), existam inversores em que o controlo de potência a inserir na rede seja automaticamente feito pela fonte, ou seja, inversores sem o algoritmo de extracção máxima de potência. O inversor actuaria sempre em sincronismo e da mesma maneira o que faria funcionar o sistema algures num ponto próximo da potência máxima.[15]

Já as características eléctricas de uma turbina eólica doméstica são de mais difícil caracterização e desadequadas a um ajuste tão simples: trata-se nestes casos de uma máquina alternada, pelo que existe uma rectificação e à partida há necessidade de armazenamento temporário em condensadores para filtragem.

Associado ao microaerogerador existe uma série de armazenamentos de energia, correspondendo isso a uma característica mais complexa. O gerador tem inércia mecânica e é indutivo. Por outro lado, o próprio perfil da velocidade do vento é muito mais descontínuo e intermitente do que a intensidade da radiação solar, pelo que dá à partida a sensação que, sem um sistema de controlo adequado, o fluxo de potência seria desadaptado e descontrolado.

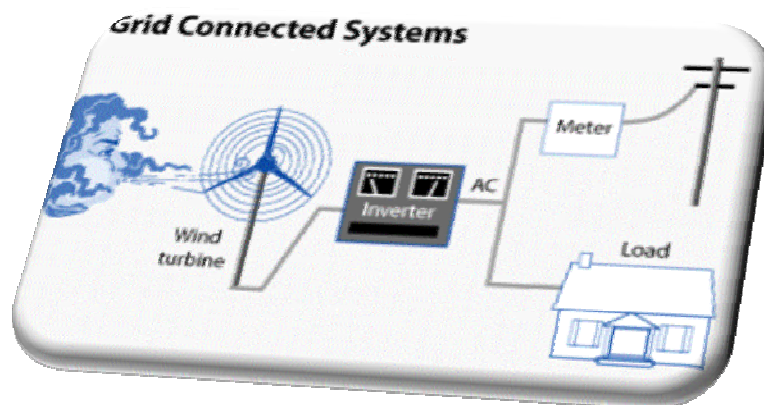


Figura 10: Inversor (*grid-connected*) para um sistema eólico

Os desafios para o futuro passam por aumentar a flexibilidade, baixar o tamanho e preço, e aumentar a fiabilidade e eficiência dos inversores. Um dispositivo conversor bidireccional que conseguisse adaptar uma larga gama fontes/produtores seria o limite para a flexibilidade. No caso dos painéis solares, a modularidade e o tamanho dos inversores são características importantes. Aumentar as frequências de *switching* e a eficiência é uma necessidade se quisermos diminuir o tamanho. Note-se que no futuro, a energia eléctrica pode estar ligada a quase tudo que se submeta a radiação solar.

³¹ Como não temos acesso à arquitectura dos produtos comerciais, apenas podemos especular.

2.3 TOPOLOGIAS DE INVERSORES

Os princípios subjacentes aos inversores (comutados) síncronos assentam nos princípios das fontes comutadas. Por isso é importante fazer uma breve abordagem aos mecanismos de regulação (com especial enfoque na regulação comutada), para se passar às fontes comutadas e aos inversores em si.[7]

2.3.1 Noções de Reguladores Lineares

Em electrónica, um regulador linear é um regulador de tensão baseado num dispositivo activo (como por exemplo um transistor bipolar ou FET³²) a operar na sua região linear (por contraste, um regulador de comutação baseia-se num transistor forçado a actuar como um interruptor ligado/desligado) ou dispositivos passivos, como díodos de zener (a operar na sua região de ruptura). O regulador é projectado para se comportar como uma resistência variável que ajusta constantemente uma malha de resistências (divisor resistivo) para manter constante uma tensão na saída.

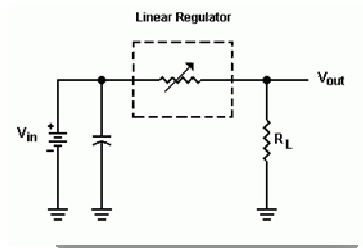


Figura 11: Regulador Linear Genérico

Como quase todos os dispositivos electrónicos existentes funcionam com tensões de alimentação constantes, os reguladores estão presentes (virtualmente) em todas as aplicações electrónicas actuais, pois é este dispositivo que mantém a tensão constante independentemente das variações de demanda de corrente na carga ou alterações na tensão de entrada. Evidentemente, nenhum regulador linear do mundo consegue fornecer uma tensão de saída superior à tensão de alimentação.

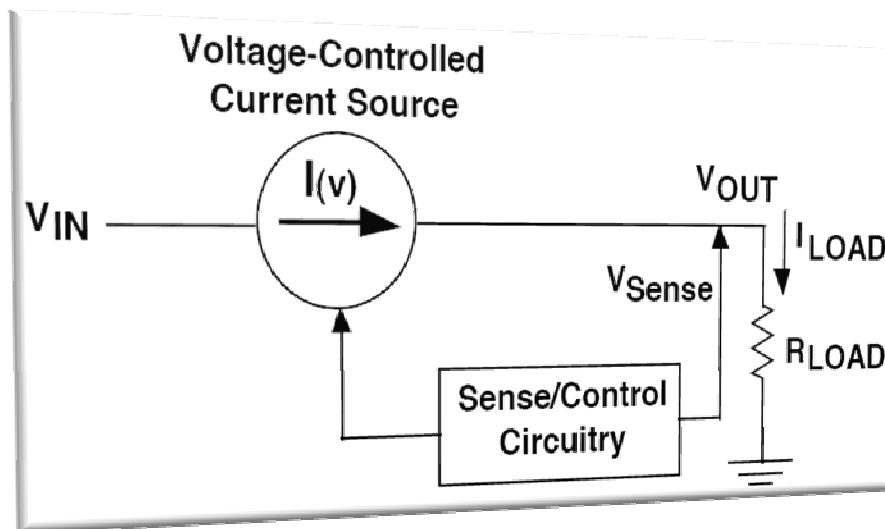


Figura 12: Diagrama funcional de um Regulador Linear

O circuito de controlo tem de monitorizar a tensão de saída, V_{out} , e ajustar a fonte de corrente, $I(v)$, às necessidades da carga R_{LOAD} , mantendo a tensão de saída no valor desejado. A máxima corrente que o regulador consegue fornecer (mantendo a regulação) é definida pelo limite da fonte de corrente.[3]

³² Transistor de efeito de campo, do inglês *Field Effect Transistor*.

A tensão de saída é controlada através de uma malha de realimentação, que necessita obviamente de compensação para assegurar estabilidade. A maior parte dos reguladores possuem algum tipo de compensação interna e são completamente estáveis sem adição de componentes externos. Uns outros reguladores (como os de tipo *Low-Dropout*³³), necessitam de uma capacidade externa ligada entre a saída e a massa para garantir estabilidade.

Uma outra característica de qualquer regulador linear é que este requer um período de tempo finito e definido para “contrabalançar” a tensão de saída regulada depois de uma mudança na corrente de carga. Este “lapso” de tempo define o parâmetro chamado resposta transiente, que é a medida de quanto rápido o regulador regressa às condições iniciais anteriores à alteração na carga.

Os reguladores lineares dissipam energia para regular. Por construção o seu rendimento é mau quando a gama a regular é grande. Usam-se em regulações de saída dos reguladores de comutação ou em circuitos incompatíveis com o maior ruído dos reguladores de comutação, mas genericamente são aplicados em circuitos de baixa ou muito baixa tensão.[20]

2.3.2 Conceitos de Comutação

Como preparação para a abordagem a reguladores de comutação e fontes comutadas, dar-se-à um curta exposição sumária de algumas relevâncias, começando pelos conceitos de comutação: lei da indutância, transformadores e PWM.

2.3.2.1 Lei da Indutância

Quando uma tensão é aplicada aos terminais de uma indutância (ou bobine)³⁴, passará nessa mesma indutância uma corrente que variará no tempo, mesmo que a tensão aplicada permaneça constante. Analogamente, equivale dizer que, aplicar uma corrente (que varia no tempo) aos terminais de uma indutância, causará uma diferença de potencial (tensão) aos seus terminais. É, portanto, necessária uma variação no tempo da intensidade de corrente para que haja uma diferença de potencial nos terminais da indutância. Se a corrente for constante (regime estacionário) não existe essa queda de tensão.[33]

Assim, a lei fundamental que define a relação entre tensão e corrente numa indutância genérica é dada por:

$$v = L \times \frac{di}{dt} \Leftrightarrow i = \frac{1}{L} \int v \, dt$$

Da lei evocada acima, duas importantes características de uma indutância se podem retirar:

- A tensão numa indutância é função apenas das variações de uma corrente no tempo. Uma corrente estacionária (DC, corrente contínua) numa indutância, não causa queda de tensão³⁵;
- A corrente que circula numa indutância não pode variar instantaneamente (intervalo de tempo zero), pois teoricamente seria necessária uma tensão infinita para que tal variação se verificasse. No entanto, quanto mais fortemente variar na indutância, maior será a queda de tensão aos seus terminais.³⁶

Seguem-se os princípios da lei da indutância ilustrados.

³³ Não se entrará em grande detalhe neste assunto, mas há três tipologias básicas de reguladores lineares: *Standard (NPN Darlington) Regulator*; *Low Dropout* ou *LDO Regulator*; *Quasi LDO Regulator*.

³⁴ Unidade de indutância: Henry (H)

³⁵ À excepção da desprezável queda de tensão no cobre, usado na bobinagem.

³⁶ Nota: Ao contrário da corrente (na bobine), a tensão aos seus terminais pode variar instantaneamente.

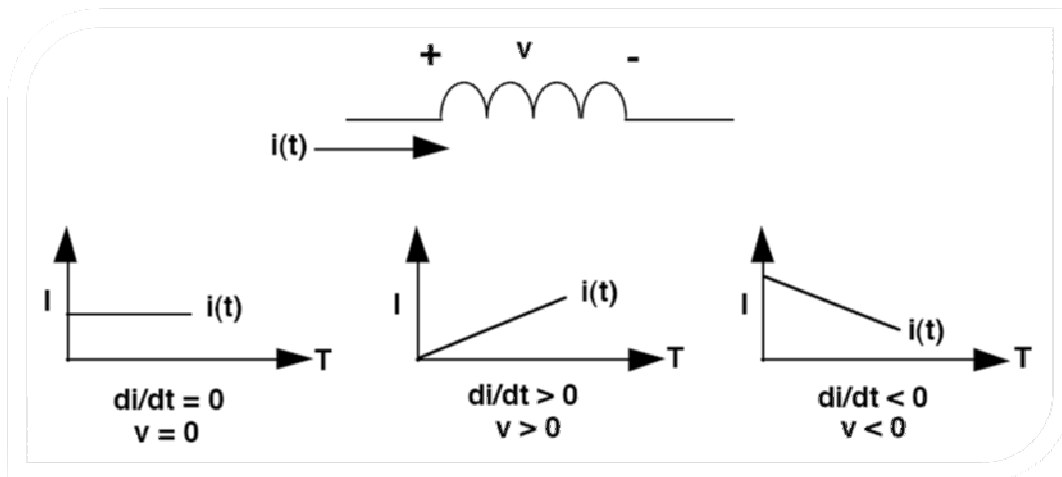


Figura 13: Relação tensão/corrente numa indutância

O termo $\frac{di}{dt}$ é um parâmetro importante, pois é a medida da variação da corrente no tempo. No gráfico da corrente em função do tempo, $\frac{di}{dt}$ é o declive da recta num ponto.

- No primeiro gráfico (mais à esquerda) está patente que uma corrente constante no tempo tem um valor de $\frac{di}{dt}$ igual a zero (declive nulo) e significa que não há tensão na indutância.
- O gráfico ao centro mostra que a corrente quando aumenta no tempo, ($\frac{di}{dt}$ tem valor positivo) gera uma tensão positiva na indutância.
- Quando a corrente decresce no tempo (gráfico mais à direita), $\frac{di}{dt}$ é negativo, tal como o valor da tensão na indutância.

De notar que uma corrente (de declive positivo ou inferior) linear no tempo na indutância existe apenas quando há uma tensão de valor constante aplicada aos seus terminais.[19]

2.3.2.2 Considerações Gerais sobre Transformadores³⁷

Um transformador é um dispositivo de transferência de energia, que tem dois (ou mais) enrolamentos (em torno do núcleo metálico) magneticamente acoplados. Tem um lado de entrada (o primário) e um lado de saída (o secundário). O seu funcionamento é explicado através das Leis³⁸ de Faraday³⁹, que nos diz que quando um circuito sofre uma corrente variável produz um campo magnético, e

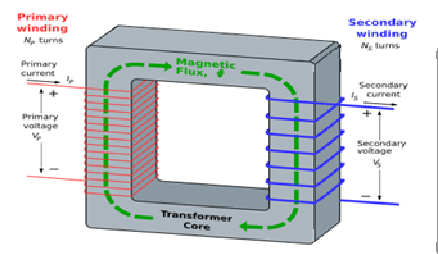


Figura 14: Indução e Fluxo Magnético no Núcleo de um Transformador (Step-Down)

³⁷ Este assunto será abordado com mais detalhe, mais adiante

³⁸ Ou lei da indução electromagnética que quantifica a indução electromagnética, que é o efeito da produção de corrente eléctrica num circuito colocado sob efeito de um campo magnético variável ou por um campo magnético constante. É a base do funcionamento dos alternadores, dínamos e transformadores.

³⁹ Químico e físico experimental inglês, introduziu os conceitos de campo e de linhas de campo e descobriu a indução electromagnética e o diamagnetismo. Construiu o primeiro gerador de corrente. Estudou a electrolise estabelecendo as bases da electroquímica.

quando um circuito é sujeito a um campo magnético variável é gerada uma corrente eléctrica.

A energia eléctrica aplicada no primário é convertida num campo magnético, que por sua vez induz uma corrente eléctrica no secundário (que carrega energia que pode assim ser transferida para a carga ligada ao secundário). A energia aplicada ao primário tem de ser na forma de tensão alternada (regime AC), que assim gera uma corrente que varia repetidamente no primário, pois só um campo magnético variável produzirá corrente no secundário.

São utilizados numa gama muito variada de aplicações de processamento de informação e de energia eléctrica. Salientam-se, entre outras, a elevação e a redução da tensão e do número de fases em redes de transporte e distribuição de energia eléctrica, a redução da tensão ou da corrente em instrumentos de medida, a adaptação de impedâncias em amplificadores sintonizados em aplicações de radiofrequência e frequência intermédia, a adaptação de resistências em aplicações áudio, ou simplesmente o isolamento galvânico entre partes de um mesmo circuito eléctrico.[7]

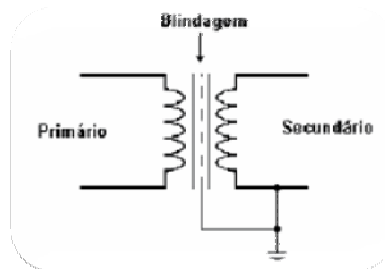


Figura 15: Transformador de Isolamento

Ficam alguns tipos de transformadores usados em diversas aplicações:

- Transformador de alimentação: o transformador de alimentação convencional é usado na conversão da tensão da rede para a tensão de funcionamento dos circuitos electrónicos. O rendimento é muito elevado, pois funciona com frequências muito baixas, é feito normalmente com chapas de aço no núcleo, possuindo algumas vezes blindagens metálicas para evitar interferências e blindagens de resina para evitar vibrações mecânicas.
- Transformador de áudio: usado em aparelhos de áudio com válvula e algumas configurações com transistores, no acoplamento entre etapas amplificadoras e na saída para os altifalantes. Geralmente é semelhante ao transformador de alimentação embora possa usar núcleo de aço ou ferrite. A resposta dentro da gama de frequências de áudio⁴⁰, 20 a 20000 Hz, não é perfeitamente linear, mesmo usando materiais de alta qualidade no núcleo, esta variação de eficiência ao longo da faixa de áudio limita o seu uso.
- Transformador de corrente: é usado sobretudo para efectuar medições, em cabines e painéis de controlo de máquinas e motores. Consiste num anel circular ou quadrado, com núcleo de chapas de aço e enrolamento com poucas espiras, que se instala passando o cabo dentro do furo, este actua como o primário. A corrente é medida por um amperímetro ligado ao secundário.
- Transformador de RF: os circuitos de radiofrequência⁴¹ usam transformadores no acoplamento entre etapas dos circuitos de rádio e TV. A sua potência em geral é baixa, e os enrolamentos têm poucas espiras, utilizando sobretudo núcleo de ferrite. Costumam ter blindagem de alumínio, para dispersar interferências no circuito onde estão inseridos e nos equipamentos circundantes.
- Transformadores de pulso: são usados para acoplamento e separação entre circuitos, isolando o circuito de controlo, de baixa tensão e potência. Têm geralmente núcleo de ferrite e invólucro plástico.

⁴⁰ Frequência áudio: 20 a 20000 Hz

⁴¹ Radiofrequência (RF), acima de 30kHz

Na figura está explícito o funcionamento básico de um transformador genérico.

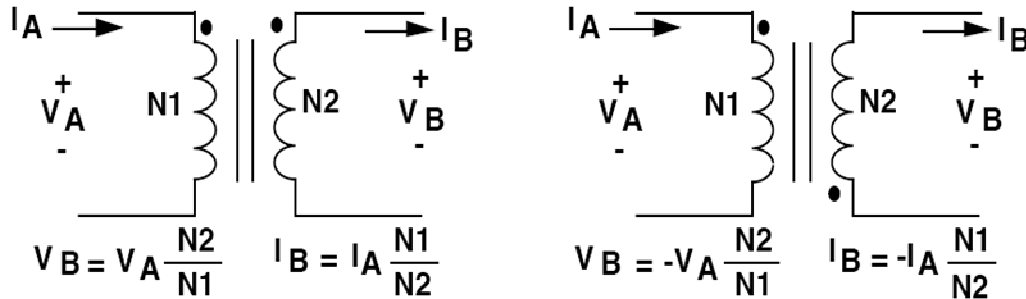


Figura 16: Funcionamento Básico de um Transformador

O transformador actua de modo que uma tensão (em regime AC) variável no tempo é transformada num valor mais alto ou mais baixo, dependendo da relação de transformação⁴². O transformador não adiciona potência, ou seja, a relação de potência ($P = V \times I$) em cada um dos lados do transformador será constante. É por esta razão que bobinar com mais espiras fará com que o valor de tensão seja mais alto, mas passe uma corrente menor, enquanto um número mais elevado de espiras, terá menos tensão (os seus terminais) mas uma corrente mais alta.[19]

O ponto no enrolamento (no símbolo de transformador) identifica a sua polaridade em relação ao outro enrolamento. Pontos em lados distintos (desenho da direita), significam que o transformador inverte a polaridade.

Um excelente exemplo de como um transformador funciona, pode ser facilmente encontrado debaixo do capô de um automóvel, onde o transformado é usado para gerar 40000 Volt que activam as velas de ignição.

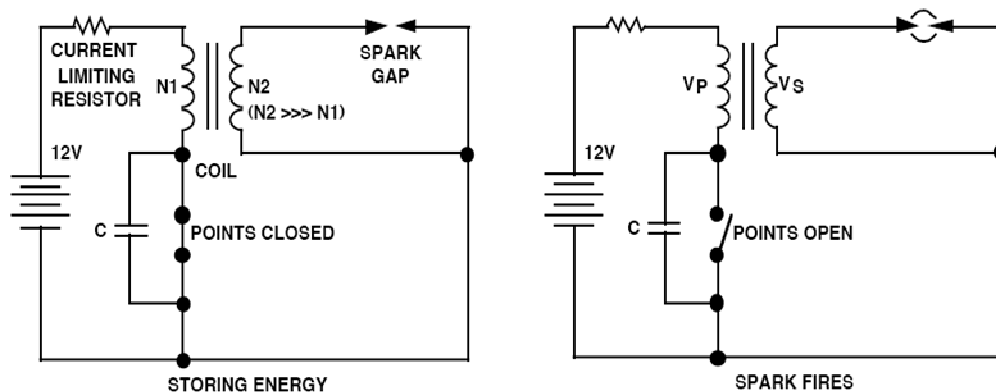


Figura 17: Circuito com Transformador Usado para Gerar uma Faísca

A “bobine” usada para gerar a faísca voltaica é o transformador, com uma alta relação de transformação (do secundário para o primário).

⁴² Número de espiras no primário vs. número de espiras no secundário.

Quando o interruptor fecha, a corrente começa a fluir no enrolamento primário e acaba por atingir o valor de 12V que a bateria e a resistência impõem. Então a corrente é um valor DC fixo, o que significa que não há tensão em nenhum dos terminais do transformador.

Por sua vez quando o interruptor abre, a corrente no primário decai abruptamente causando uma alta tensão neste enrolamento. Esta tensão acoplada magneticamente (e aumentada) no secundário gera assim uma tensão aos terminais deste de 30 a 40 kV.

Como referido anteriormente, a lei da indutância postula que não é possível variar instantaneamente a corrente numa bobine (seria necessário uma tensão infinita para isso). E é este princípio que causa o arco voltaico (faísca) entre os contactos usados em interruptores em circuitos com grandes cargas indutivas. No instante em que o interruptor abre. A alta tensão gerada permite que electrões “saltem” o espaço (ar) impedindo assim que a corrente varie (seja interrompida) bruscamente. Colocando um condensador entre os contactos ajuda a reduzir o efeito de arco voltaico. Na ignição automóvel, este dito condensador é colocado entre os interruptores para minimizar os danos devidos à faísca que se dá quando a corrente se “quebra” no enrolamento com baixa-tensão.

2.3.2.3 Modulação por Largura de Pulso, PWM⁴³

A modulação PWM é um método de transmissão de informação que usa uma série de impulsos. Os dados que estão a ser transmitidos são codificados com a largura destes impulsos para controlar a quantidade de potência a ser enviada para a carga. Por outras palavras, PWM é uma técnica de modulação para a geração de largura variável de impulsos quadrados para representar a amplitude de uma onda de entrada ou de um sinal analógico.

A grande vantagem do uso circuitos PWM como controladores relativamente aos circuitos resistivos é a eficiência. Enquanto o PWM trabalha com eficiência quase total (menos de 1% de perda), para um circuito resistivo a trabalhar a 50% da carga, 50% vai realmente para alimentação da carga e 21% é perdido em aquecimento nas resistências. Isto é uma grande vantagem para fontes de energia renovável.

Uma outra grande vantagem é que, na modulação de largura de pulso, os pulsos estão com o valor nominal de pico, gerando um maior torque nos motores. Um controlador resistivo, já que deverá ter uma tensão reduzida, poderá causar paragem de um motor devido ao torque reduzido. Além disso, pode-se usar potenciômetros menores para controlar uma variedade de cargas, ao contrário dos resistivos que usam potenciômetros grandes e caros.

Uma das desvantagens do PWM é a complexidade e a possibilidade de gerar interferência de radiofrequência, mas esta pode ser minimizada colocando o controlador perto da carga e em alguns casos, usando filtros adicionais. Apesar disto, é uma ferramenta poderosíssima no controlo de circuitos analógicos usando saídas digitais geradas por um microcontrolador (que é precisamente o caso do inversor proposto nesta dissertação), fazendo com que a modulação PWM seja usada desde aplicações de instrumentação a comunicações, passando por controlo de potência e conversão.[20]

⁴³ Do inglês PWM, Pulse Width Modulation. Ou Modulação PWM, daqui em diante esta será a notação adoptada para referência a Modulação por Largura de Pulso.

Para exemplificar o funcionamento do PWM, segue-se uma análise ao efeito de aplicar séries de impulsos quadrados a um filtro LC⁴⁴.

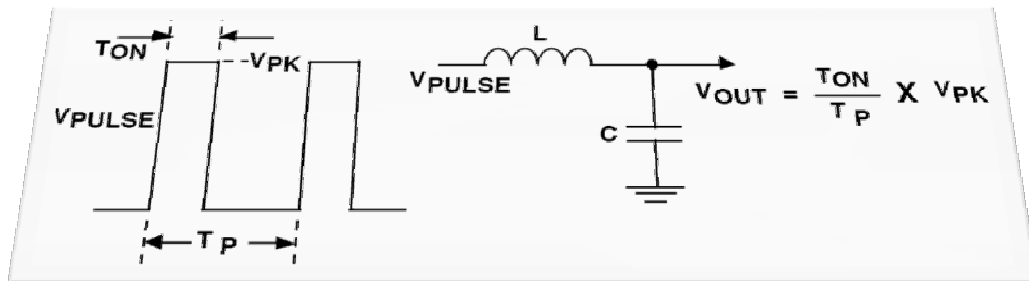


Figura 18: Funcionamento da Modulação PWM num circuito LC

Os pulsos quadrados são filtrados e geram uma tensão DC de valor igual ao valor de pico da amplitude dos impulsos multiplicado pelo *duty-cycle*⁴⁵. Controlando o *duty-cycle* controla-se directamente a tensão de saída.[20]

Todos os reguladores de comutação (de que se fala seguidamente) utilizam uma forma de regulação da tensão de saída baseada em PWM. A malha de realimentação ajusta a tensão de saída alterando o tempo de ON (como explicado anteriormente) do interruptor no regulador.

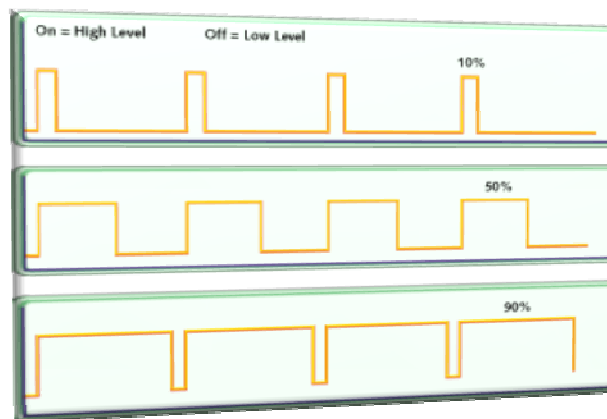


Figura 19: Sinais de PWM com *duty-cycles* diferenciados

⁴⁴ Um circuito LC genericamente, é um oscilador electrónico que consiste numa bobine e um condensador. A corrente eléctrica irá

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

alternar entre eles a uma frequência (angular) de ressonância dada por:

⁴⁵ *Duty-cycle* do inglês, fracção cíclica, razão cíclica ou ciclo de trabalho. Em telecomunicações e electrónica o termo *duty-cycle* é utilizado para descrever a fracção de tempo em que um sistema ou função está em um estado "activo", neste caso, a fracção de tempo em que o pulso está no seu valor alto.

A figura mostra três distintos sinais de PWM. No primeiro caso, o output do PWM está a 10%, isto é, o sinal está ON durante 10% do período total (do sinal) e OFF nos outros 90% do período. Nos casos seguintes o PWM está a 50% e a 90%. Estes três casos diferentes de PWM codificam três diferentes valores de sinais analógicos, a 10%, a 50% e a 90% do valor completo.

2.3.3 Topologias de Reguladores de Comutação

Os reguladores de comutação têm por base o *switch*, indutâncias, condensadores e díodos. O *switch* é implementado com um transistor. Os circuitos usados na conversão DC-DC serão agora apresentados, bem como os seus básicos princípios de operação.[20]

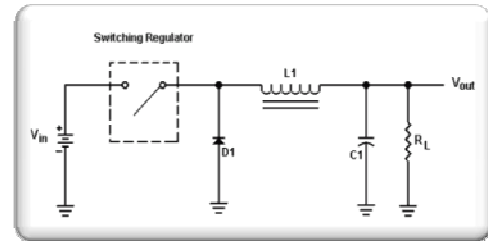


Figura 20: Regulador de Comutação

2.3.3.1 Regulador Buck

É o regulador de comutação mais popularmente utilizado. Usa-se para converter inferiormente, ou seja, uma tensão DC para uma tensão DC mais baixa com a mesma polaridade. O que é essencial em sistemas que usam, diferentes alimentações (por exemplo 24V ou 48V), que tem de ser convertida para os valores mais usuais (15V, 12V e 5V) com pouca perda de potência.

O conversor Buck, usa um transistor como *switch* (interruptor) que alternadamente liga e desliga a tensão de entrada à bobine, como demonstra a figura.

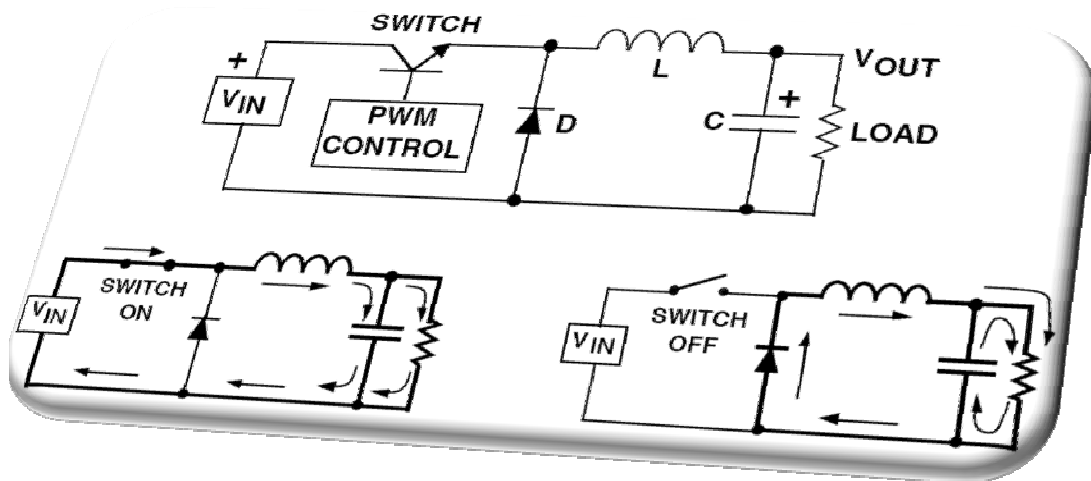


Figura 21: Regulador Buck

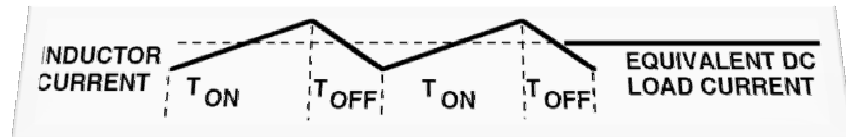
O diagrama mostra o caminho da que a corrente percorre, quando o interruptor está ligado ou desligado.

Quando o interruptor liga, a tensão de entrada é ligada à bobine. A diferença entre as tensões (de entrada e saída) causa um aumento da corrente na bobine. Durante o tempo de ON, a corrente circula que na carga quer no condensador (de saída), o que o faz carregar.

Quando o interruptor desliga, a tensão aplicada na bobine desaparece. Não obstante, como a corrente numa indutância não pode variar instantaneamente, a tensão na bobine terá manter-se-à de modo a manter a corrente constante.

No terminal da bobine na entrada aparece então uma tensão negativa pelo decréscimo de corrente, que eventualmente alcança o ponto em que o díodo entra em condução. Então a corrente na bobine passa pela carga e “entra” através do díodo de novo.

O condensador descarrega para a carga durante o tempo de OFF, contribuindo para o total da corrente na carga (a corrente na carga durante o período OFF é dado pela soma das correntes da bobine e do condensador). A forma da corrente na bobine está similarmente reproduzida na figura que se segue.



Como explicado, a corrente na bobine sobe quando o interruptor liga, e desce quando este desliga. A corrente regulada DC na carga é o valor médio da corrente na bobine. A diferença pico-a-pico na forma de onda da corrente na bobine é chamada de “corrente de *ripple* na bobine”, que é escolhida para suficientemente grande para manter este *ripple* 20% a 30% abaixo da corrente DC regulada.[20]

Na maioria dos dispositivos que usam reguladores Buck, a corrente na bobine nunca baixa até zero durante a operação de carga (é o “modo de operação contínua”). O desempenho do regulador melhora quando opera em modo contínuo, e permite que o *output* de potência máximo seja obtido de uma dada tensão de entrada e o rácio de corrente do interruptor. Em aplicações em que a corrente máxima na carga é razoavelmente baixa, pode ser vantajoso projectar o regulador para funcionar em modo descontínuo⁴⁶. Nestes casos, operar em modo descontínuo pode levar a um tamanho de circuito/componentes menor (a bobine é muito mais pequena).

O modo de operação descontínuo com valores de corrente na carga mais baixos é geralmente imperceptível e até conversores projectados para operar em modo contínuo acoplados a uma carga máxima se tornam descontínuos quando a corrente de carga decresce (normalmente sem causar problemas).

⁴⁶ É costume analisar este filtro no domínio do tempo, porque se este funcionar em modo descontínuo a análise na frequência perde utilidade. Este deixa de ser um sistema linear e por isso na frequência deixa de possuir uma função de transferência do tipo:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

2.3.3.2 Regulador Boost

O regulador Boost, transforma uma tensão de entrada DC numa tensão de saída DC mais alta, com a mesma polaridade. O circuito deste regulador e os pormenores do fluxo de corrente durante os períodos ON e OFF está abaixo.

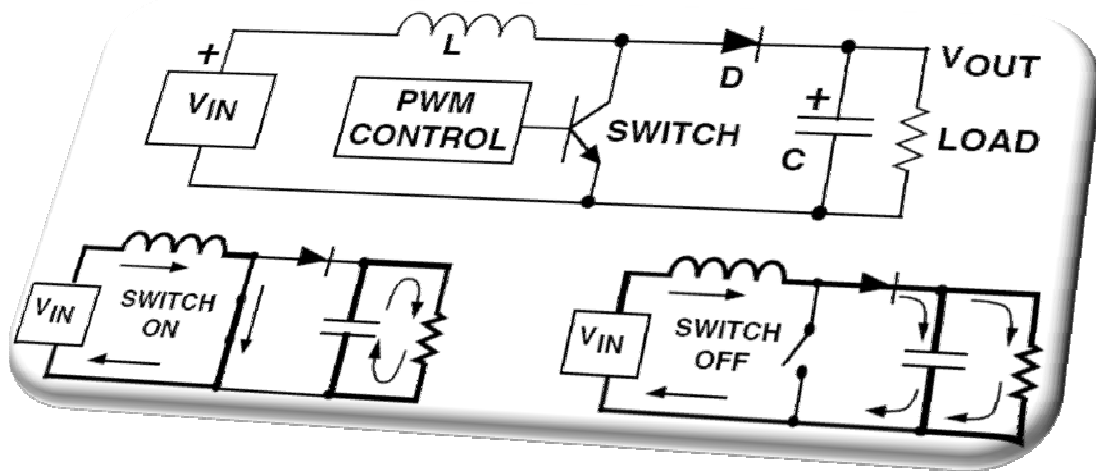


Figura 23: Regulador Boost

Sempre que o interruptor liga, a tensão à entrada é aplicada à bobine, o que faz com que a corrente que a atravessa aumente. Quando o interruptor desliga, a corrente (em decréscimo) na bobine faz com que o terminal (do lado do interruptor) da bobine tenha uma tensão positiva. A corrente flui através do diodo e carrega o condensador com uma tensão superior à tensão de entrada. Durante este período, a corrente da bobine divide-se entre o condensador e a carga, ao passo que quando o interruptor está ligado, a corrente de carga é apenas fornecida pela corrente (de descarga) do condensador.

Um detalhe importante quando se projecta um regulador Boost é que a corrente na carga e a corrente no transístor (interruptor) não é igual, e a corrente de carga máxima disponível é sempre menor que a corrente de *switching* do transístor.

É de notar que a potência total para conversão em qualquer regulador é igual à tensão de entrada multiplicada pela máxima corrente de entrada (em média), que é sempre menos que a corrente do transístor. Como a tensão de saída do regulador Boost é mais alta que a tensão de entrada, é fácil concluir que a corrente na saída será menor que a corrente de entrada.

2.3.3.3 Regulador Buck-Boost (Inversor)

O regulador Buck-Boost (ou regulador inversor), transforma uma tensão de entrada DC e transforma-a numa tensão de saída com polaridade inversa à da primeira. A tensão negativa da saída pode ser mais alta ou mais baixa em amplitude que a tensão de entrada.

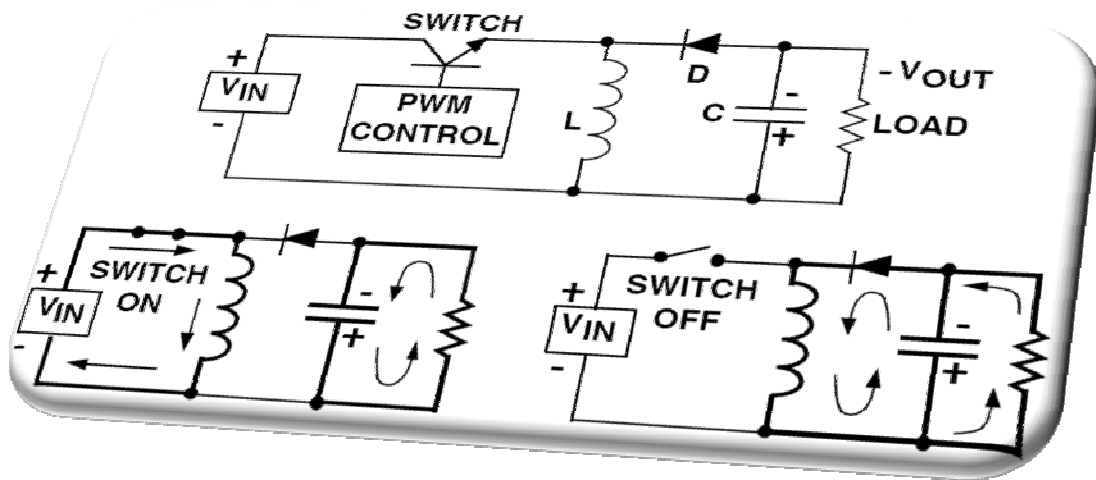


Figura 24: Regulador Buck-Boost (ou Regulador Inversor)

Quando o interruptor liga, a tensão de entrada é ligada à bobine, causando um aumento da corrente que passa nela. Neste período, a descarga do condensador de saída é a única fonte de corrente na carga. Este comportamento requer que a carga perdida pelo condensador seja reposta durante o período OFF do transistor.[20]

Quando o interruptor desliga, o decréscimo de corrente na bobine, faz com que a tensão no terminal do diodo se torne positiva. Este facto activa o diodo, permitindo que corrente na bobine forneça o condensador de saída, quer a carga.

Como descrito, a corrente na carga é fornecida pela bobine durante o período OFF e pelo condensador no período ON análogo.

2.3.3.4 Regulador Flyback

O regulador Flyback é a mais versátil de todas as topologias, permitindo que se crie uma ou mais tensões distintas na saída, algumas das quais podem inclusivamente ser de polaridade oposta.⁴⁷

Conversores Flyback têm ganho notoriedade em sistemas alimentados a baterias, onde uma única tensão tem de ser convertida (regulada) para as necessidades do sistema (por exemplo, +5V, +12V e -12V) com muito boa eficiência de conversão de potência. Seguidamente ilustra-se um regulador Flyback de uma só saída.

⁴⁷ Esta topologia de regulador (Flyback) será um componente fundamental num dos módulos do inversor em causa na presente tese de dissertação para geração de tensões de alimentação distintas e isoladas. Este assunto será profundamente focado mais adiante.

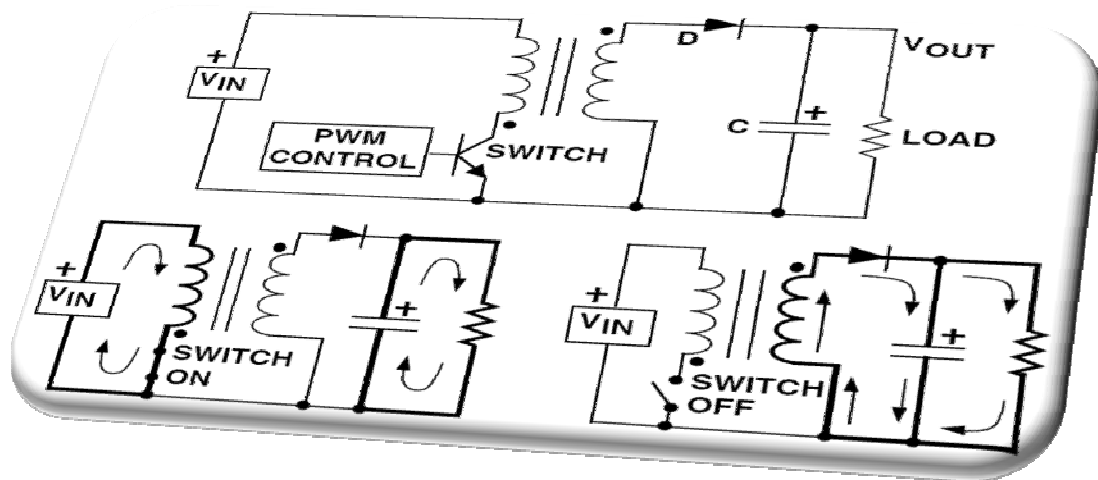


Figura 25: Regulador Flyback de uma única Saída

A característica mais importante num regulador Flyback é as fases do transformador, como os pontos (dos enrolamentos) no esquema demonstram.

Quando o interruptor liga, a tensão de entrada é aplicada no primário do transformador, o que causa um aumento da corrente que o atravessa. De notar que a polaridade da tensão no primário é negativa (mais negativa no terminal mais perto do ponto), o que causa uma tensão no secundário de igual polaridade (a amplitude da tensão no secundário é função da relação de transformação).

A tensão (de polaridade) negativa que surge no enrolamento secundário corta o diodo, impedindo que passe corrente no enrolamento secundário durante o período ON. Neste período, a corrente na carga é fornecida apenas pelo condensador.

Quando o interruptor comuta para OFF, o decréscimo de corrente no primário, causa uma inversão de polaridade, ou seja, a tensão (“no ponto”) torna-se positiva. Ao mesmo tempo, a tensão no primário é “reflectida” no secundário com a mesma polaridade. Esta tensão positiva no secundário, põe o diodo em condução, permitindo que corrente flua quer para a carga quer para o condensador. A carga do condensador “perdida” para a carga durante o período ON, é restituída agora durante o período OFF.

Os reguladores Flyback operam em modo contínuo (a corrente no enrolamento secundário é sempre menor que zero) ou em modo descontínuo (a corrente no secundário baixa a zero em cada ciclo de *switching*).

Gerar múltiplas saídas é a enorme vantagem dos Flyback, como ilustra a figura. Em aplicações destas, a saída de corrente mais elevada é normalmente seleccionada para gerar a realimentação dos pulsos PWM, o que significa que esta saída é directamente regulada.[20]

Os outros enrolamentos secundários, são regulados indirectamente, pois a largura dos seus pulsos seguirá a largura imposta pelos do enrolamento regulado. A regulação

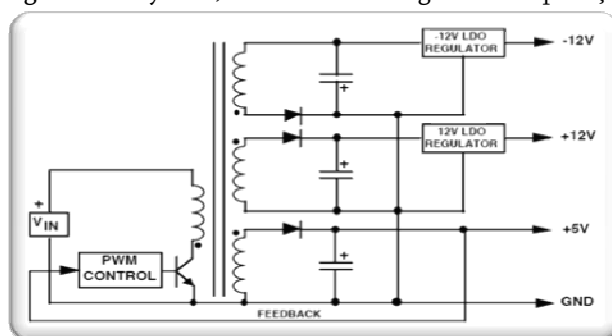


Figura 26: Regulador Flyback com múltiplas saídas

da carga nos secundários não é muito exacta (tipicamente imprecisão de 5% a 10%), mas é razoavelmente adequada para a maior parte das aplicações. Não obstante se for necessária melhor regulação nos secundários de menor corrente, um pós-regulador LDO⁴⁸ será uma excelente solução. A tensão no secundário é imposta 1V acima da tensão desejada, e o LDO fornece uma saída regulada excelente com custo de eficiência desprezável.

2.3.3.5 Regulador Push-Pull

O conversor Push-Pull usa dois transístores para fazer a conversão DC-DC, como ilustra a figura.

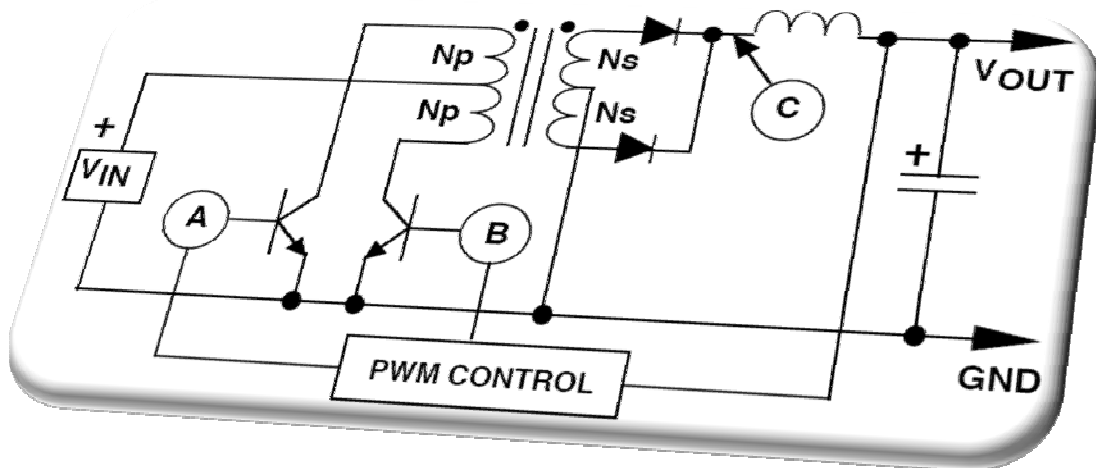


Figura 27: Regulador Push-Pull

O conversor opera accionando cada transístor em ciclos alternados (os dois nunca estão ON, nem OFF, ao mesmo tempo). A corrente no secundário flui ao mesmo tempo que a corrente no primário (quando qualquer um dos transístores está ON).

Exemplificando, quando o transístor “A” liga, a tensão de entrada é aplicada no terminal superior do enrolamento primário com a polaridade negativa. Do lado do secundário, a tensão de polaridade negativa que aparece no enrolamento faz com que o díodo (de baixo) entre em condução. Isto permite que haja corrente da bobine para o condensador de saída e a carga.

Quando o transístor “B” liga, a tensão de entrada aplicada ao enrolamento de baixo do primário (com polaridade positiva) faz com que essa mesma tensão de polaridade positiva no lado do secundário accione o díodo de cima, e a corrente flui agora para o condensador e a carga.

Uma importante característica de um regulador Push-Pull é que os transístores têm de ser capazes de “aguentar” mais do dobro da tensão de entrada: quando um transístor liga (e a tensão de entrada é aplicada num dos enrolamentos do primário) a mesma amplitude de tensão é induzida no outro enrolamento primário, mas fica “no ar” por cima da tensão de entrada. Isto põe o colector (no caso de um transístor bipolar, ou o dreno no caso de um transístor MOSFET) do transístor cortado a uma tensão duas vezes maior que a tensão de entrada em relação à massa.

⁴⁸ Relembrar, regulador linear low-dropout. Secção anterior, em reguladores lineares.

Este “dobro da tensão de entrada” faz do Push-Pull mais recomendado para aplicações de baixas tensões de entrada. Tem sido vastamente utilizado em sistemas alimentados a baterias de 12V e 24V.

A figura seguinte mostra o diagrama temporal, que mostra detalhadamente a relação entre os pulsos de entrada e saída.

É importante notar que a frequência dos pulsos de tensão no lado do secundário é o dobro da frequência de operação do PWM que ataca os dois transístores. Ou seja, se o *chip* gerador do PWM estiver a gerar os pulsos a 50 kHz no lado do primário, a frequência dos pulsos no secundário será de 100 kHz.

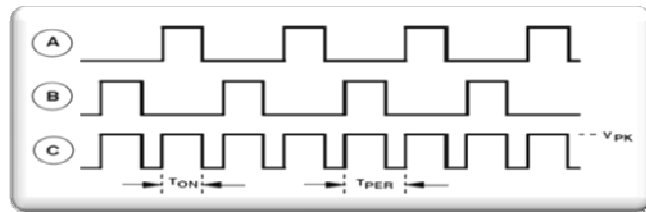


Figura 28: Diagrama Temporal de um Regulador Push-Pull

$$V_{out} = V_{pk} \times \frac{T_{on}}{T_{per}}$$

A tensão DC de saída é dada por:

$$V_{pk} = (V_{in} - V_{switch}) \frac{N_s}{N_p} - V_{recte}$$

A tensão de pico nos pulsos do secundário é dada por:

Esta relação demonstra porque é que os reguladores Push-Pull são recomendado para conversores de baixa tensão: a tensão em cada enrolamento do primário (que é o que fornece a potência para a conversão) é a tensão de entrada total menos (apenas) a tensão de saturação dos transístores escolhidos para *switch*.

Se os ditos transístores forem MOSFET, então a queda de tensão nos switches poderá ser otimizada para um valor bastante baixo, o que permitirá uma utilização mais eficiente da tensão de entrada. Uma outra vantagem dos Push-Pull é que também podem gerar múltiplas tensões de saída independentes e com tensões de polaridade inversa (tal como o Flyback), apenas adicionando mais enrolamentos secundários. Ou seja, pode gerar-se a partir de uma bateria quaisquer tensões que o sistema necessite.

Uma desvantagem do regulador Push-Pull é que precisa de um bom emparelhamento dos transístores para que não haja tempos diferentes de comutação, pois isto levaria à saturação do núcleo do transformador e ineficiência do regulador.[20]

2.3.3.6 Regulador de Meia-Ponte

O regulador de meia-ponte, é um tipo de regulador de dois transístores escolhido frequentemente para projectos de alta-potência. É recomendado para aplicações que alimentem cargas de 500W a 1500W, e opera geralmente directamente da rede eléctrica (AC).

Apesar de ligado directamente à rede AC, não é utilizado um enorme transformador de 50 Hz⁴⁹. Todos os transformadores no regulador de meia-ponte usados para conversão de potência operam à frequência de comutação (tipicamente 50 kHz ou mais), o que significa que podem ser significativamente mais pequenos e eficientes.

⁴⁹ Eliminando assim o componente maior, mais pesado e mais caro de uma típica aplicação alimentada por um transformador (ligado à rede).

Uma importante vantagem do meia-ponte é o isolamento entrada/saída (a saída regulada DC é electricamente isolada da linha AC). Porém, isto significa que o circuito de controlo do PWM tem de ter como referência a terra da saída DC. A tensão que alimenta os circuitos de controlo vem normalmente duma linha DC gerada por um pequeno transformador de 50 Hz alimentando um regulador de três terminais. Nalgumas implementações que exigem alta eficiência, a saída do transístor passa a alimentar os circuitos de controlo depois da fase de arranque do sistema.

A base (ou gate) dos transístores de comutação tem de estar isolada da parte de potência do circuito através de um drive. A complexidade adicionada deste isolamento necessário é uma desvantagem quando se usam reguladores do tipo meia-ponte.[20]

Nas soluções mais usuais, quando se rectifica uma linha de tensão 230VAC com uma ponte-completa e filtrada por um condensador, é gerada uma tensão não regulada de 300VDC que depois se aplica a um conversor DC-DC. Se se usa 115VAC, um circuito duplicador de tensão é tipicamente usado para gerar a linha de 300V.

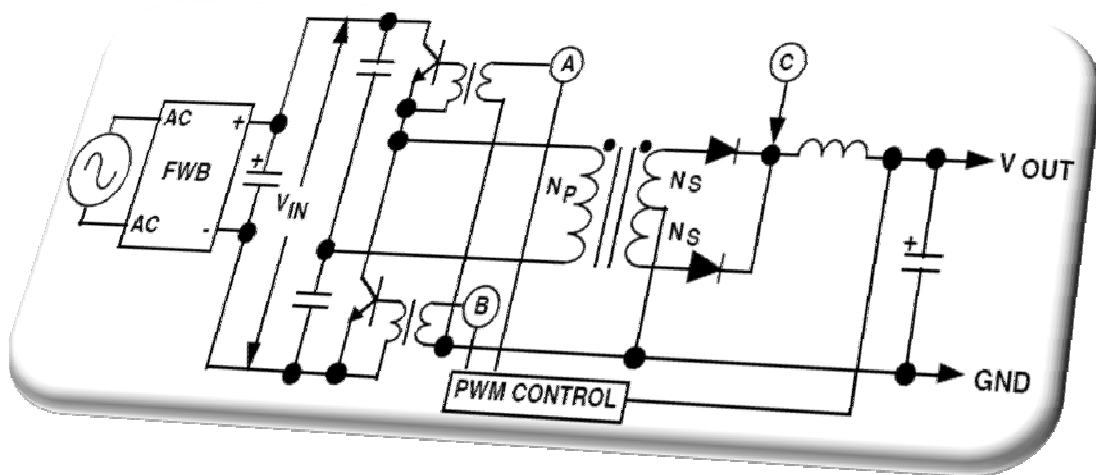
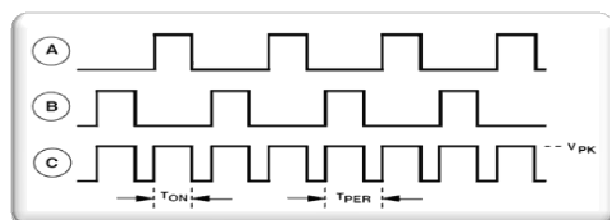


Figura 29: Regulador de Meia-Ponte

O conversor de meia-ponte (na figura anterior) tem um divisor capacitivo directamente na tensão (não regulada) de entrada DC, o que fornece uma tensão de referência de $\frac{1}{2} V_{in}$ a um terminal do enrolamento primário do transformador. O outro terminal do primário é alternadamente “levado acima e abaixo” conforme os transístores alternadamente ligam e cortam.

Os transístores de comutação põem uma metade da tensão de entrada no enrolamento primário durante o período ON, e inverte a polaridade conforme os transístores vão alternando. Os transístores de comutação nunca estão ON ao mesmo tempo, caso isso acontecesse queimariam (já que estão ligados directamente a V_{in}). O diagrama temporal do meia-ponte que se segue é o mesmo que o diagrama temporal do regulador Push-Pull.

Quando o transístor “A” liga, a tensão de entrada é positiva e aplicada ao enrolamento primário. Do lado do secundário, a tensão de polaridade positiva (amplitude desta tensão é dada pela relação de transformação) que aparece no enrolamento faz com que o díodo rectificador



(de cima) entre em condução, fornecendo corrente ao condensador e à carga.

Quando o transistor “B” liga (e o “A” corta no mesmo instante), a polaridade da tensão no primário é inverte-se, tal como a polaridade na tensão do secundário, activando o diodo de baixo (que também deixará passar corrente para a carga e o condensador).

Num conversor de meia-ponte, quer a corrente no primário, quer no secundário circulam no transformador ao mesmo tempo (independentemente do transistor que esteja a conduzir), fornecendo a carga com corrente e carregando o condensador. Este descarrega (para a carga) apenas durante o tempo em que ambos os transístores estão cortados (OFF).

É fácil verificar que os pulsos de tensão no lado do secundário (aplicados ao filtro LC) ocorrem com o dobro da frequência dos pulsos PWM que controla os transístores de comutação.

A tensão DC de saída é de novo dada por:

$$V_{out} = V_{pk} \times \frac{T_{on}}{T_{per}}$$

A tensão de pico nos pulsos do secundário é dada por:

$$V_{pk} = \left(\frac{1}{2} V_{in} - V_{switch} \right) \frac{N_s}{N_p} - V_{rect}$$

2.3.3.7 Regulador de Ponte-Completa

O regulador de ponte-completa necessita de um total de quatro transístores de comutação para fazer a conversão DC-DC. Este tipo de regulador é frequentemente encontrado em aplicações que são acopladas directamente à linha AC, permitindo cargas na ordem de 1kW a 3kW.

Tal como no regulador de meia-ponte, é uma tensão não regulada de 300VDC que este regulador converte de uma tensão *standard* de 230VAC depois de rectificada e filtrada. Outra importante característica deste tipo de regulador é o isolamento galvânico (pelo transformador de comutação) que permite, entre a linha AC e o controlo (PWM). Circuito de controlo esse que esta referenciado à massa da saída, necessitando de uma linha de alimentação independente por isso, o que é uma desvantagem.[20]

O esquemático simplificado de um regulador de ponte-completa:

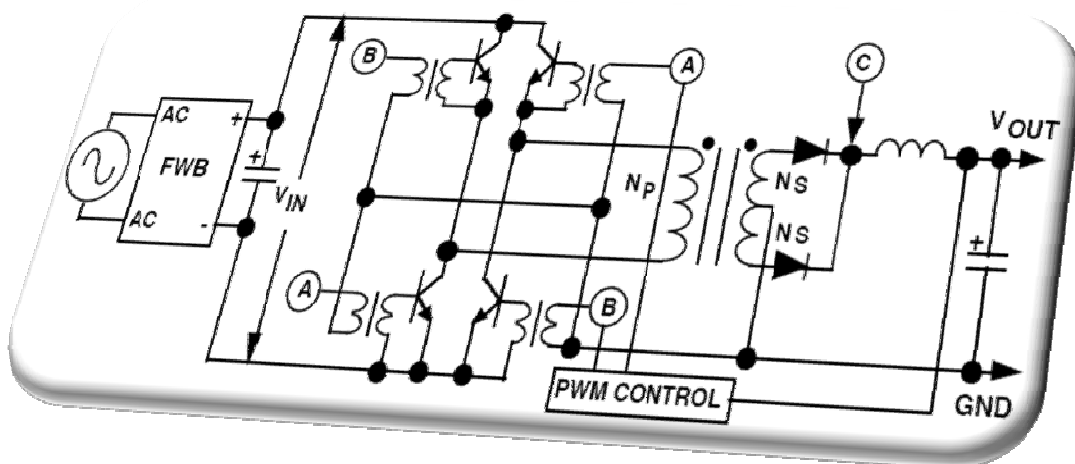


Figura 31: Regulador de Ponte-Completa

Ao enrolamento primário do transformador é aplicada (toda) a tensão de entrada V_{in} quando qualquer dos pares de transístores de comutação (“A” ou “B”) liga. A utilização da totalidade da tensão de entrada significa que um ponte-completa produz a maior potência de carga de todos os tipos de reguladores. O diagrama temporal é idêntico ao de meia-ponte.

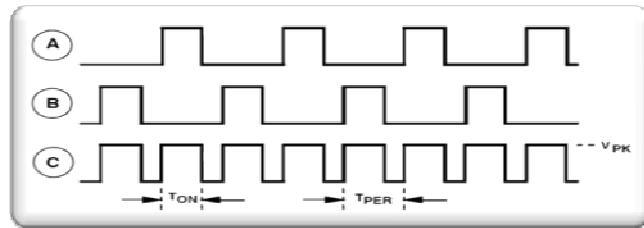


Figura 32: Diagrama Temporal do Regulador de Onda-Completa

$$V_{out} = V_{pk} \times \frac{T_{on}}{T_{per}}$$

A tensão DC de saída é de novo dada por:

$$V_{pk} = (V_{in} - 2V_{switch}) \frac{N_s}{N_p} - V_{rect}$$

A tensão de pico nos pulsos do secundário é dada por:

2.3.4 Princípios de Fontes de Potência Comutadas

As fontes comutadas são assim conhecidas, pois incorporam um regulador de comutação, são muito mais complexas, e tendem a gerar significativa interferência electromagnética.

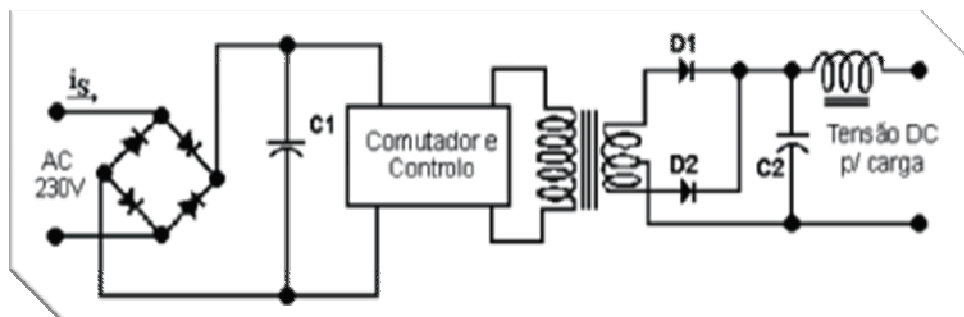
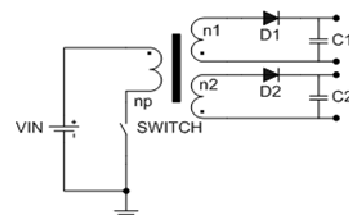


Figura 33: Diagrama de uma Fonte de Alimentação Comutada [Kennedy, 1996, adaptado]

Voltando à Fonte de alimentação do tipo Flyback (usa um regulador homónimo), pois é de crucial importância no módulo de *interface* do projecto. Um caso comum de utilização do Flyback é na geração de alimentações isoladas (como ilustrado na figura ao lado). Nesse caso o armazenamento de energia indutiva é feito pelo transformador, pois este possui sempre uma indutância de magnetização.

Neste caso, quando o *switch* está *ON* a indutância de magnetização do transformador carrega. Devido ao facto da polaridade estar invertida na saída do transformador, os diodos não conduzem. Quando o *switch* está *OFF* a energia armazenada

Figura 34: Geração de Alimentações isoladas com base num Flyback



na indutância do transformador passa para os secundários. O modelo seguinte é equivalente ao anterior e é mais claro para se perceber o funcionamento do Flyback e a característica de saída. Os transformadores agora são ideais, ou seja, a corrente de magnetização é zero.[20]

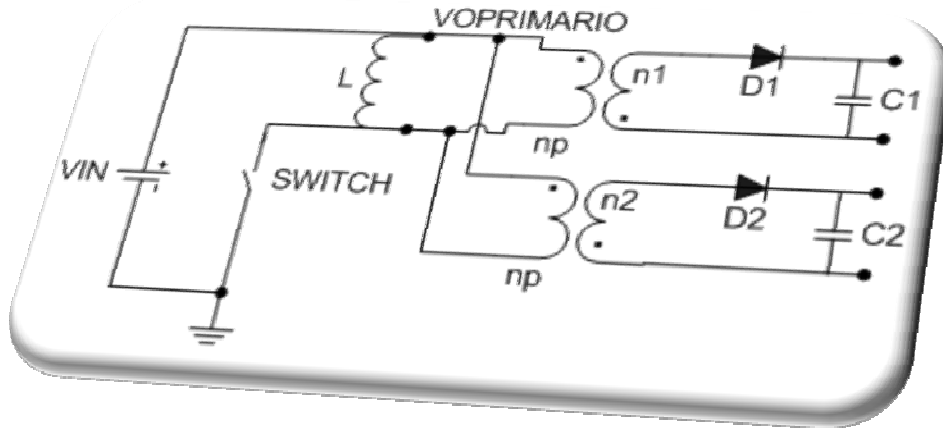


Figura 35: Geração de alimentações isoladas, modelo equivalente

Atingido o regime estacionário e admitindo saídas estabilizadas com pouco *ripple*, pelas mesmas razões no caso mais simples, a aproximação para a tensão das saídas reflectida ao primário é:

Das deduções vistas anteriormente para *duty-cycle* e PWM: $V_{\text{primário}} = V_{\text{in}} \left(1 + \frac{T_{\text{on}}}{T_{\text{off}}} \right)$

Tensão isolada e regulada 1: $V_1 = V_{\text{primário}} \frac{n_1}{n_p}$

Tensão isolada e regulada 2: $V_2 = V_{\text{primário}} \frac{n_2}{n_p}$

Repare-se que se a tensão numa das saídas baixar, vai receber mais corrente até a relação entre as tensões das saídas ficar equilibrada, isto porque o diodo da saída com tensão mais baixa é que vai conduzir na altura da descarga de energia da indutância.

Podemos ver que o Flyback se comporta muito bem no que respeita à regulação com várias saídas. Assim se usarmos realimentação, basta amostrar uma das saídas (tipicamente a de maior potência de saída). É por estas razões que esta topologia é muito usada em fontes de baixa potência. [28]

No entanto existem alguns problemas, nomeadamente com o transformador. Pelo facto de o usarmos para armazenar energia, podem existir problemas com a saturação do núcleo para correntes elevadas. Pelo facto de o excitarmos sempre no mesmo sentido o material vai criando magnetismo remanescente e podemos magnetizar o núcleo, o que faz com que o máximo campo de indução magnética (ou máxima corrente) que

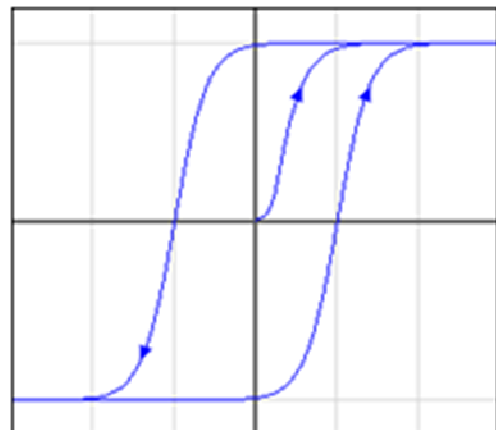


Figura 36: Campo de indução magnética em função da corrente de magnetização (Histerese no Núcleo)

podemos aplicar, diminua em relação à utilização bipolar. Quanto mais corrente, menor é a indutância e mais rápido sobe a corrente. Uma variação brusca de carga pode provocar um erro no sistema de controlo e levar o núcleo à saturação (figura seguinte), danificando o *switch*. É boa prática usar um *gap*⁵⁰ no núcleo para evitar a saturação.[31]

Como $V_o = V_{in} \left(\frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} \right)$, para tempos T_{on} maiores que T_{off} , ou seja, para *duty-cycles* maiores que 50%, o valor estacionário da saída subiria rapidamente para infinito, o que predispõem a ocorrência de rápidos aumentos de corrente. Por essa razão deve evitar-se *duty-cycles* maiores que 50% na saída do sistema de controlo.

A tensão inversa do *switch* depende do *dutycycle* aplicado. É igual à tensão de entrada mais a tensão de saída reflectida ao primário. É bom por um diodo zener de protecção em paralelo com a entrada do transformador para evitar problemas com a tensão inversa.

As grandes vantagens do Flyback são a simplicidade e flexibilidade. Quando se quer isolamento galvânico⁵¹, não existe necessidade de indutância separada.

Como desvantagens há que referir ainda, a necessidade de uma capacidade de saída maior, *spikes*⁵² gerados pela comutação e correntes (e o *ripple*) e na indutância maiores em relação a uma versão Forward. Repare-se que entre o abrir do *switch* e a condução do diodo, o transformador fica em aberto, gerando *spikes*. [26]

⁵⁰ A presença de *gaps* faz com que um núcleo magnético aumente bastante a emissão electromagnética (ou dispersão magnética), isto é, o campo electromagnético em redor do transformador é maior com a presença de *gaps*.

⁵¹ Consiste na transferência de energia eléctrica entre dois pontos, mas sem ligação por fios. O dispositivo eléctrico simples capaz de assegurar o isolamento galvânico é o transformador.

⁵² Ruído eléctrico.

Segue-se uma tabela que compara os diferentes tipos de fontes comutadas baseados em distintos reguladores de comutação.

Tipo	Potência [Watts]	Eficiência	Custo Relativo	Entrada [Volts]	Isolamento	Armazenamento Energia	Relação Tensão	Notas
Buck	0–1000	75%	1.0	5–1000	N	Bobine Única	Out < In	
Boost	0–150	78%	1.0	5–600	N	Bobine Única	Out > In	
Buck-boost	0–150	78%	1.0	5–600	N	Bobine Única	Up or down	Tensão de Saída Invertida
Flyback	0–150	78%	1.0	5–600	S	Transformador	Up or down	Múltiplas Saídas
Half-Forward	0–250	75%	1.2	5–500	S	Transformador + Bobine		
Forward		78%			S	Transformador + Bobine		Múltiplas Saídas
Push-Pull	100–1000	72%	1.75	50–1000	S			
Meia-Ponte	0–500	72%	1.9	50–1000	S			
Ponte-Completa	400–2000	69%	>2.0	50–1000	S			
Conversor Ćuk					S	Duas Bobines + Condensador		Tensão de saída negativa, quando tensão de entrada positiva
Inverting Charge-Pump					S	Bobine Única		Tensão de saída negativa e mais alta que tensão de entrada (positiva)
SEPIC ⁵³					S	Duas Bobines	Up or down	
Charge Pump					S	Apenas Condensadores		Geram altas tensões, também chamados multiplicadores de tensão

Tabela 2: Comparação entre Fontes de Potência Comutadas

2.3.5 Inversores

Há muitas topologias de inversores diferentes quer nos circuitos (de potência) quer nas estratégias de controlo. Há vários parâmetros num inversor que têm de ser tidos em conta e que podem significativamente variar, dependendo da aplicação para a qual se está a projectar o inversor.

A exigência na qualidade da forma de onda (de saída do inversor) pode ser alcançada de muitas maneiras diferentes. Podem usar-se condensadores e bobines para filtrar a dita onda de saída, mas se o projecto inclui um transformador, a filtragem pode ser aplicada ao primário, ao secundário ou a ambos os enrolamentos. Filtros passa-baixo são aplicados para permitir que a componente fundamental da forma de onda passe para a saída limitando a passagem das outras componentes harmónicas. Se o projecto implica que o inversor forneça potência a uma frequência fixa, é um filtro ressonante (oscilador) que se deve usar.

⁵³ Single Ended Primary Inductor Converter

Já no caso de uma saída com frequência de saída ajustável, o filtro deve ser ajustado para uma frequência acima da frequência máxima fundamental.

Como a maior parte das cargas contém indutâncias é costume montar rectificadores de realimentação ou díodos (montados anti-paralelamente) em cada transistor (ou pares de transistores) de comutação, consentindo assim um caminho para o pico da corrente na carga indutiva quando o *switch* comuta (para OFF).

Uma análise em Fourier⁵⁴ revela que uma onda quadrada é anti-simétrica num período de 180° e que contem apenas as harmónicas ímpares (3ª, 5ª, 7ª, etc.): formas de onda que têm uma certa largura e altura de impulso cancelam as harmónicas adicionais. Por exemplo, inserindo um pulso de tensão nula entre as secções negativa ou positiva de uma onda quadrada, todas as harmónicas múltiplas de 3, podem ser canceladas. Isto deixa apenas a 5ª, 7ª, 11ª 13ª etc. A largura dos pulsos é um terço do período de cada uma das tensões negativas e positivas, e um sexto do período de cada período de tensão nula.[6]

De um modo geral, as harmónicas são tensões ou correntes sinusoidais com frequências múltiplas inteiras da componente fundamental (50 Hz), que caracterizam a distorção harmónica da tensão ou da corrente num determinado ponto do sistema eléctrico. As harmónicas são classificadas pela ordem, frequência e sequência.

Ordem	Fund.	2.º	3.º	4.º	5.º	6.º	7.º	8.º	...	n.º
Frequência (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	...	nx50
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-

Figura 37: Classificação das Harmónicas

Alterar assim a forma de onda quadrada (é um exemplo de modulação PWM) e a largura é o procedimento para regular ou ajustar a tensão de saída do inversor. Se o controlo da tensão de saída não é necessário, um pulso de largura fixa pode ser usado (como controlo de comutação) reduzindo e cancelando assim as harmónicas seleccionadas. As técnicas de cancelamento de harmónicas são geralmente aplicadas às harmónicas mais baixas pois torna mais fácil e eficaz filtrar as altas-frequências que as baixas. Por norma, o controlo por modulação PWM produz impulsos de largura muito estreita. A frequência do número de impulsos por segundo é a frequência de comutação (ou frequência de *switching*) ou frequência da portadora (frequência de *carrier*). Este sistema de controlo mais complexo é usado em inversores (de frequência variável) de controlo de motores (geradores eólicos, por exemplo), pois permite uma generosa gama de tensões de saída, sem esquecer que o controlo através do ajuste de frequência permite um incremento na qualidade da forma de onda na saída.

Inversores de múltiplos níveis proporcionam outra maneira de resolver o problema do cancelamento de harmónicas. Estes, põem na saída uma forma de onda que tem múltiplos níveis a tensões distintas. É possível, por exemplo, gerar uma onda sinusoidal dividindo corrente DC em dois níveis de tensão diferentes, ou com base em entradas positivas e negativas com uma referência à massa. No entanto a forma de onda e a tensão de saída neste tipo de inversores é muito menos controlável e ajustável, além de que a qualidade da forma de onda à saída é muito menos usando controlo baseado em PWM.

⁵⁴ A Transformada de Fourier, é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal, i.e., como soma ou integral de funções sinusoidais multiplicadas por coeficientes ("amplitudes"). Pode ser vista como um caso particular da Transformada Z.

Do ponto de vista exterior um inversor pode ser visto como um bloco que converte DC para AC:[15]

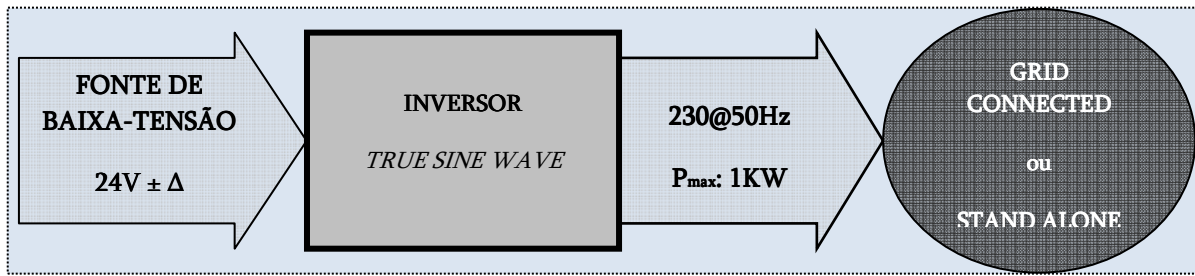


Figura 38: Inversor do ponto de vista Entrada/Saída

Tal como nos reguladores de tensão, podemos dividir os inversores consoante o princípio de regulação: podem ser lineares⁵⁵ ou de comutação. Apesar disso, os inversores de potência usam no geral o princípio das fontes de comutação.

Por questões de segurança, quando a relação de níveis de tensão entre a entrada e a saída de um conversor de energia é muito grande, o sistema deve possuir isolamento galvânico, o que implica o uso de um transformador de isolamento nalgum ponto favorável no circuito.

Apresentam-se de seguida várias estratégias para fazer o núcleo central do inversor:

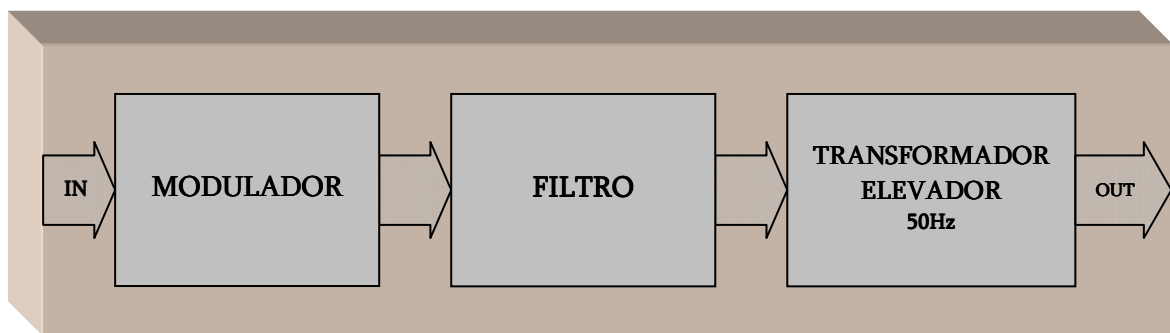


Figura 39: Inversor Clássico, o Transformador (enorme) trabalha a 50Hz

Nesta proposta, faz-se a modelação da sinusóide em baixa tensão por PWM e elevando-se seguidamente com um transformador convencional. Esta topologia é muito simples e provavelmente mais barata para baixas potências. No entanto é uma solução muito pesada, volumosa e dispendiosa, face às soluções comutadas.

As topologias seguintes recorrem ao uso de *switching* a alta-frequência. Com o aumentar das frequências (através da melhoria dos núcleos e dos *switches*) é possível fazer produtos mais leves e mais baratos.

⁵⁵ Embora haja a possibilidade de fazer inversores lineares (devido ao baixo rendimento), essa hipótese só é viável de ser usada em equipamentos de precisão de baixa potência.

A elevação de tensão seria feita com um conversor Forward em vez de um Flyback, porque as correntes são menores e com elas os problemas de saturação pela mesma proporção. Estamos basicamente a trocar saturação por mais núcleos, uma vez que o Forward necessita de mais uma indutância.

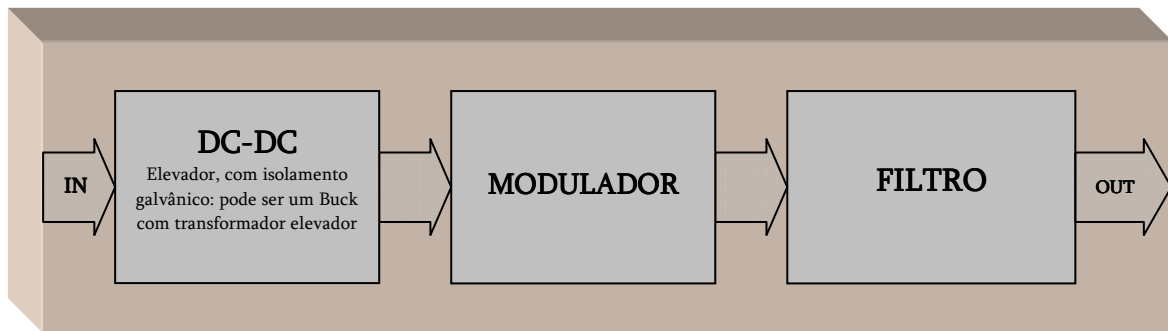


Figura 40: Inversor Comutado (Elevação DC e inversão)

Com esta solução, eleva-se a tensão para um valor superior ao valor de pico da sinusóide e depois modela-se na segunda ponte. O ajuste de nível DC e depois a modulação é uma estratégia simples e fácil de construir e afinar. É adequada por exemplo em situações em que se têm várias fontes de entrada. Todas elas teriam um regulador DC-DC que controlava o fluxo de energia de cada uma e eram juntas depois da regulação. É adequado também quando queremos muito pouco *ripple* na onda de saída. Podemos fazer a modulação a uma frequência muito alta e ter uma indutância pequena.[15]

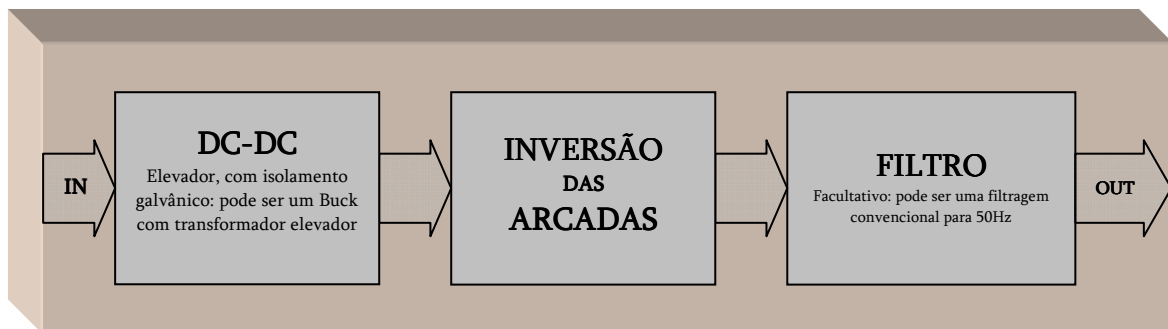


Figura 41: Inversor Comutado com Modulação no Primário

Na topologia de modulação no primário criam-se semi-arcadas de sinusóide que depois se invertem a 50Hz. A modulação no primário não pode ter componentes a baixa frequência, uma vez que o transformador não o permitiria.

2.3.6 Transformador de Potência no Inversor: o Primário

Vantajosamente escolheu-se fazer a modulação no primário. Discute-se agora o caminho a seguir mais detalhadamente.

A estratégia para a modulação é idêntica ao regulador DC-DC, mas agora o *setpoint* do regulador DC é variável no tempo, nomeadamente seguir semi-arcadas de 50Hz. De facto o transformador é excitado alternadamente, pois a rectificação no secundário é que dá origem às componentes de baixa frequência à tensão. Esta estratégia é muito apelativa, pois o potencial de melhoria do rendimento aumenta, uma vez que só há *swicthing* a alta-frequência uma única vez. Como o transformador é

excitado para gerar uma tensão que varia entre 0 e $V_{\text{sine_peak}}$, o potencial de redução das perdas no núcleo do transformador também é maior.

O núcleo tem que ser excitado alternadamente para evitar a saturação. As ilustrações que se seguem apresentam algumas formas de o fazer:

O Push-Pull usa um transformador com ponto médio à entrada. O sentido de excitação do núcleo depende do *switch* que está ligado. A vantagem é menos *switches*, mas a desvantagem é a necessidade de mais espiras no transformador (para a mesma tensão em relação a uma versão ponte-completa) e mais problemas com as altas-frequências. [3]

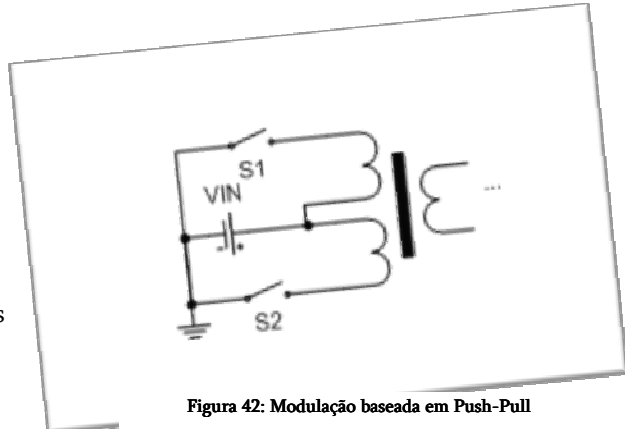


Figura 42: Modulação baseada em Push-Pull

A modulação

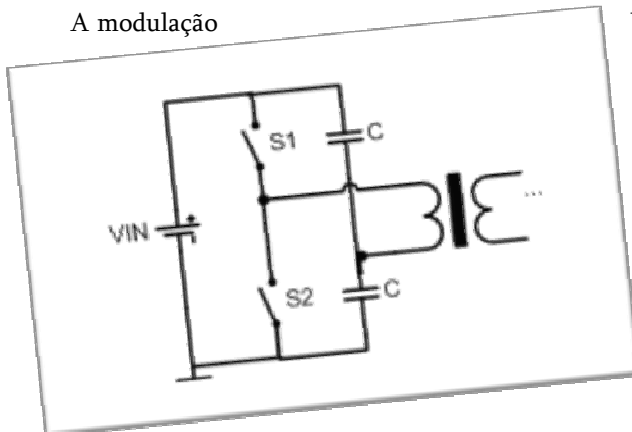


Figura 43: Modulação baseada em meia-ponte

baseada em meia-ponte tem o mesmo problema do Push-Pull no que respeita a quantidade de espiras, no entanto em relação ao ponte-completa, esta proposta usa menos dois transístores de comutação.

O ponte-completa é o melhor no que respeita ao transformador. Embora tenha mais perdas nos *switches*, porque conduzem sempre dois em série, esse facto pode transformar-se em vantagem em casos de tensões elevadas, pois a tensão máxima divide-se por dois *switches*. [3]

Escolheu-se a topologia com modulação no primário na expectativa de

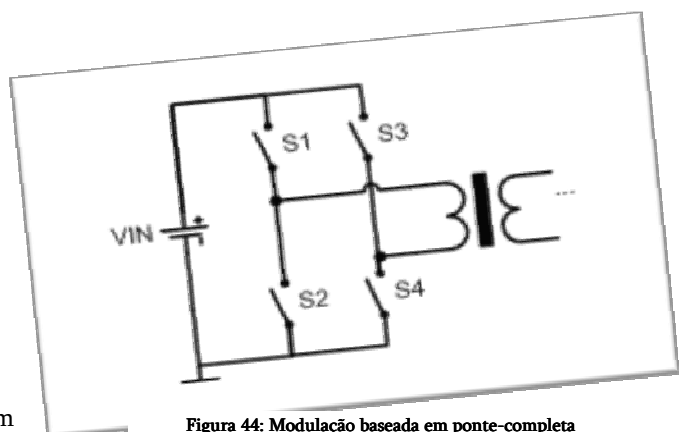


Figura 44: Modulação baseada em ponte-completa

melhor rendimento e *hardware* mais barato (o sensor de tensão intermédio necessário na topologia de elevação DC e depois modulação não é necessário aqui). A topologia de elevação e modelação de alta-frequência é um conversor Forward, nomeadamente um Buck com isolamento galvânico. O ataque é feito por ponte-completa, para evitar aumentar o tamanho do transformador.

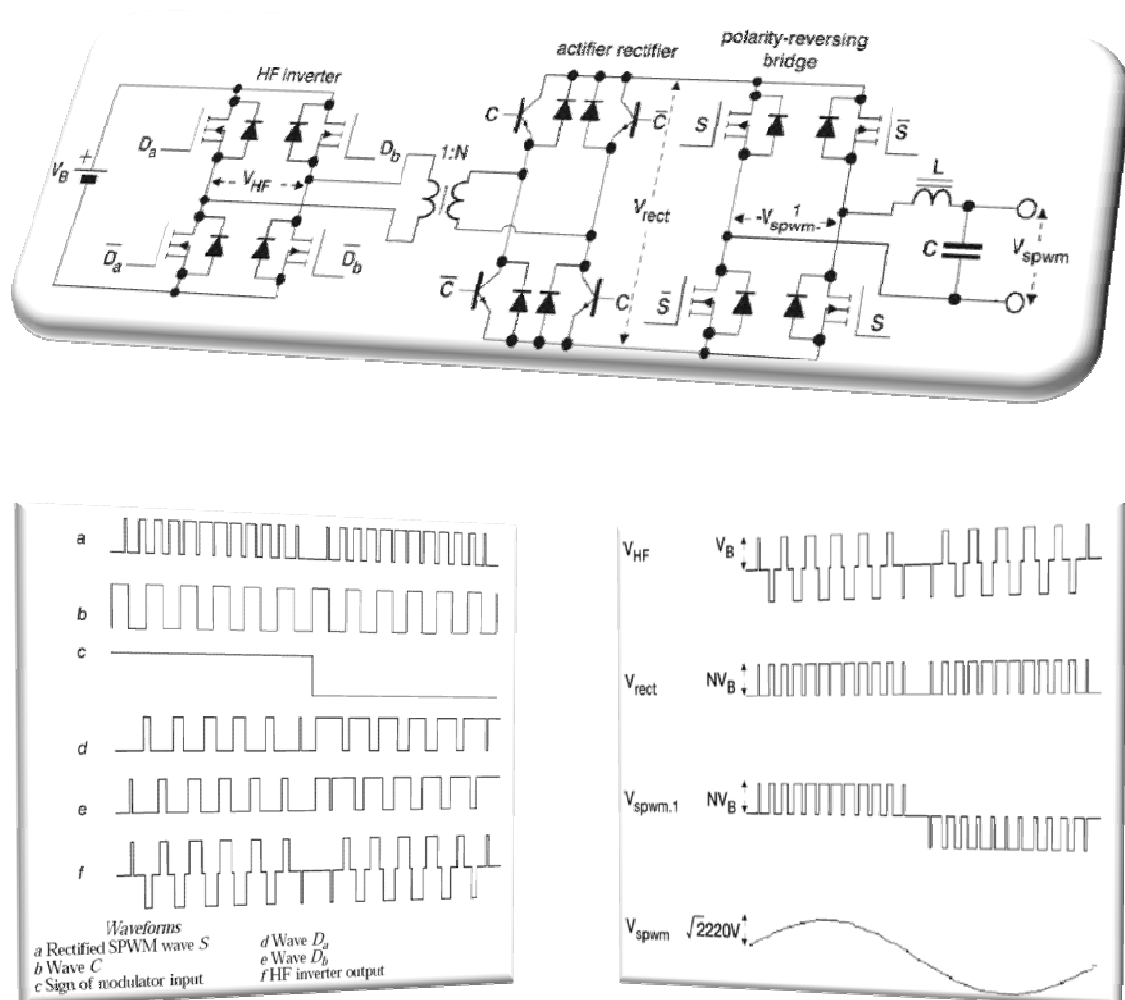
No entanto ainda há muitas opções para o secundário.

2.3.7 Transformador de Potência no Inversor: o Secundário

Segue-se a discussão para soluções de implementação do secundário.

Esta primeira topologia possui um rectificador activo. O resultado é que é possível transferir energia do secundário para o primário. Isto é particularmente atractivo quando o inversor funciona em *stand alone* e tem cargas indutivas.

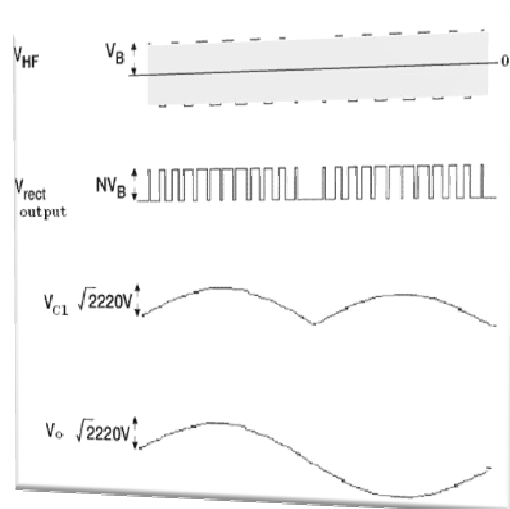
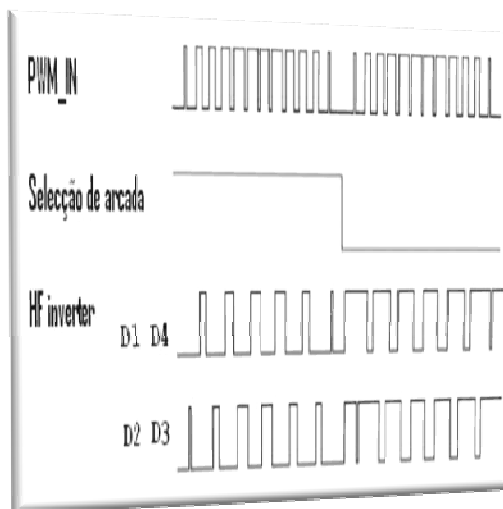
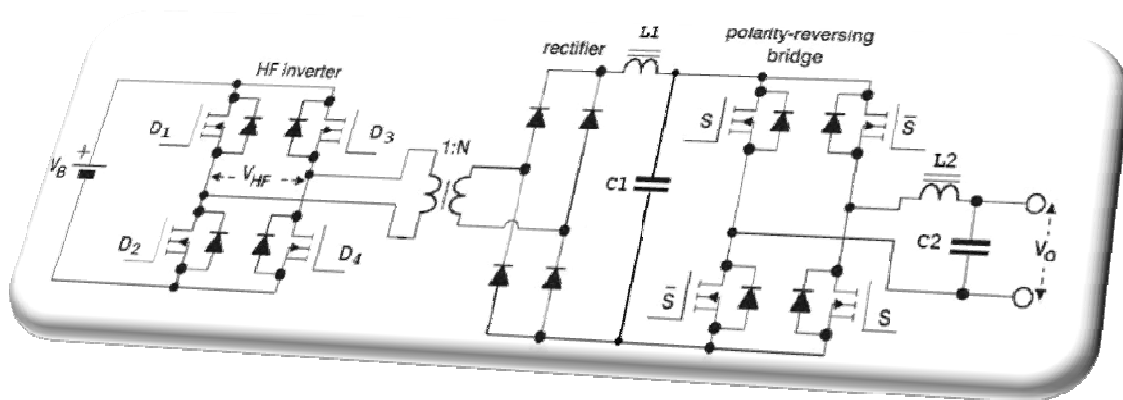
Figura 45: Ponte-completa em ambos os Enrolamentos — Fluxo de Energia Bidireccional



Os problemas das cargas fortemente indutivas são que estas não gastam a energia que recebem. Uma indutância recebe e devolve energia. Quando se faz com que a corrente se anule, estamos a forçar a sua energia a anular-se, pelo que estas geram sobre-tensões de modo a descarregar e/ou dissipar a sua energia para qualquer lado.

As duas propostas de topologias seguintes são unidireccionais no que respeita ao fluxo de energia. Em relação aos sinais de ataque do transformador também são diferentes. Na topologia anterior (a de ponte-completa), existem sempre dois *switches* ligados, enquanto nas seguintes não. O efeito é que a energia da indutância de magnetização descarrega para o secundário quando os *switches* se abrem.

Figura 46: Ponte-completa em ambos os Enrolamentos — Fluxo de Energia Unidireccional

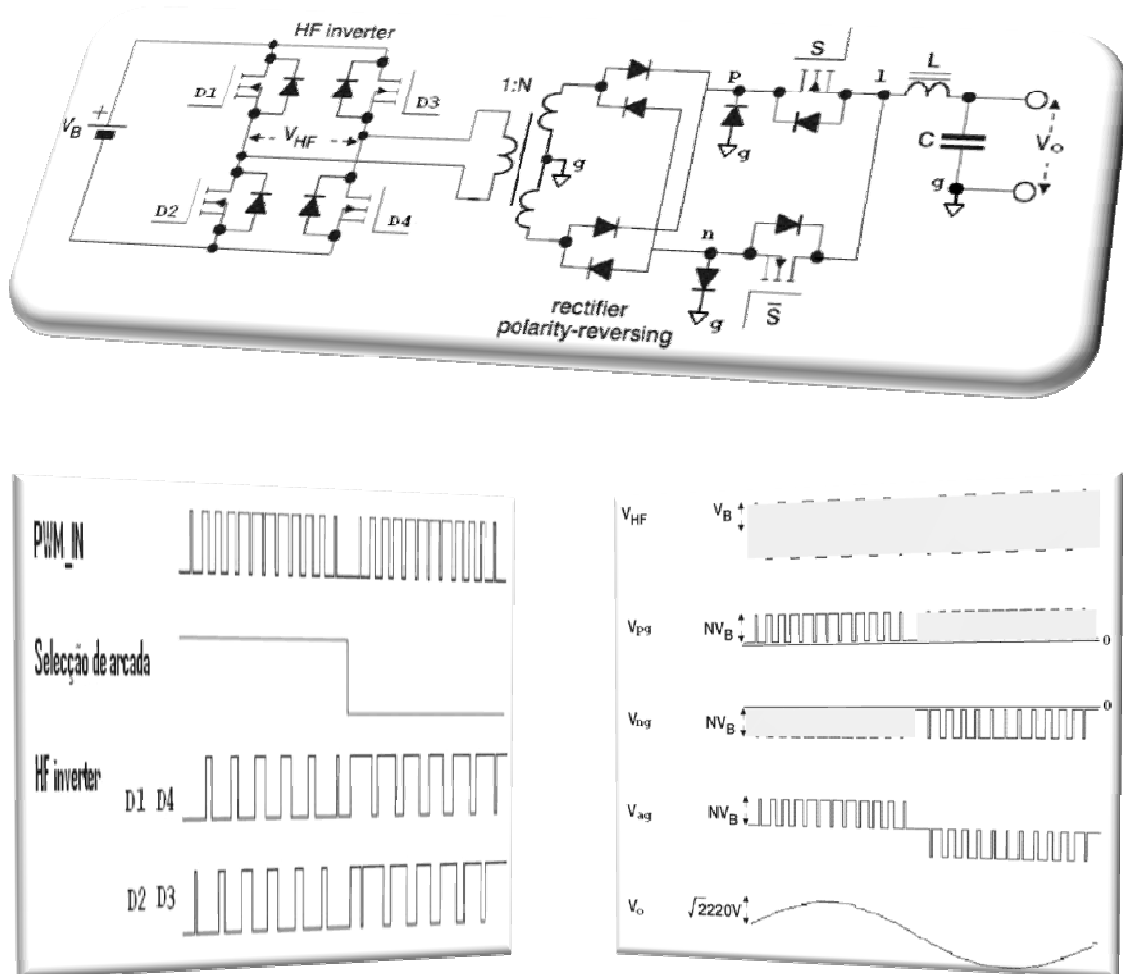


Nas topologias unidireccionais, uma solução é colocar um dispositivo que dissipe a energia e não admitir cargas excessivamente indutivas. Repare-se que uma ponte de díodos não permite a transferência de energia no sentido da entrada. Os varístores de potência são boas opções de segurança, porque são bidireccionais. Como na saída temos uma pequena capacidade, não é necessário recorrer à rapidez do diodo zener. Um varistor serve também para fazer uma protecção contra sobre-tensões através da

protecção de corrente existente (quando existe uma sobre-tensão, o varistor conduz e a protecção de corrente dispara).

Nesta segunda estratégia usa-se uma ponte de díodos normal. Convém realçar que não se pode cair na situação de ligar a ponte de selecção da arcada da sinusóide com a ponte do primário desligada, sob risco de se fazer um curto-circuito.

Figura 47: Enrolamento Duplo no Secundário — Fluxo de Energia Unidireccional



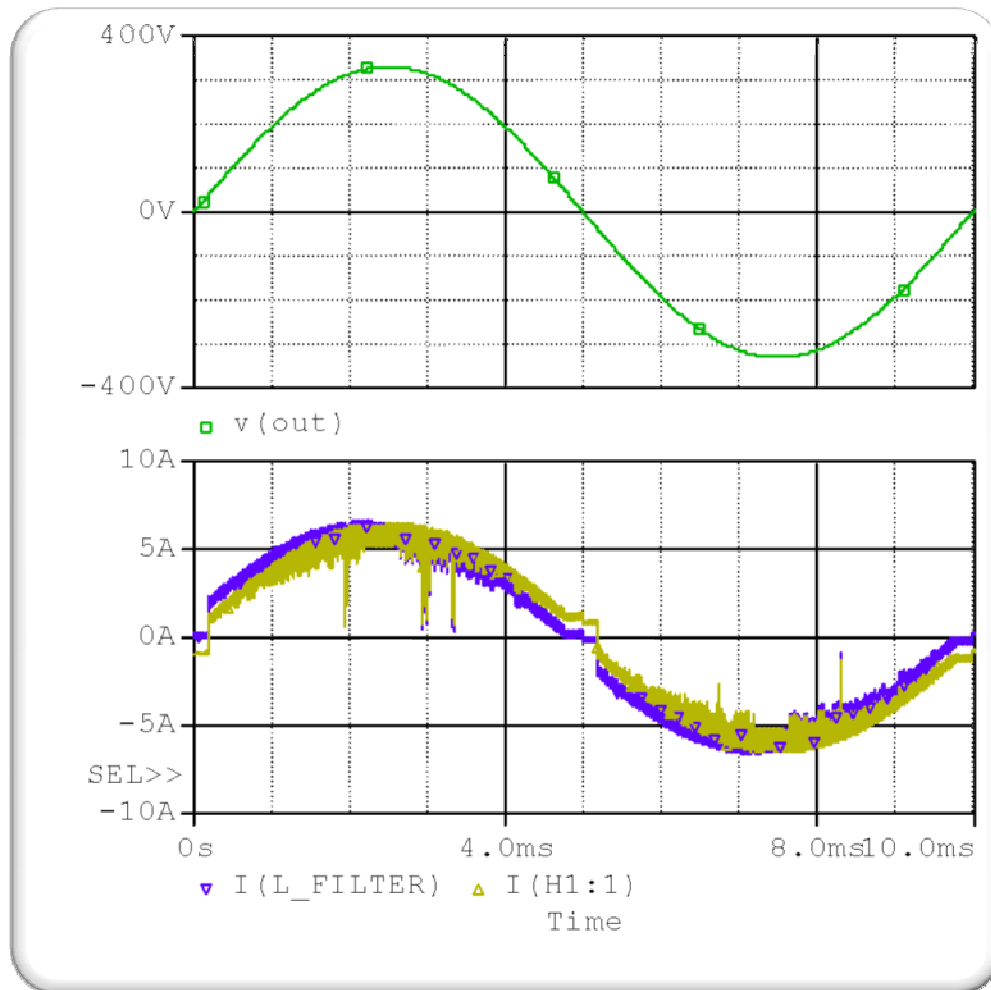
Nesta terceira situação usa-se um transformador de ponto médio no secundário. Isso traz mais problemas ao nível de concepção do transformador, que vai ter que levar mais espiras e os problemas de alta-frequência vão ser mais efectivos. Mas o maior problema reside no facto de se ter o dobro da tensão no circuito. Os *switches* vão ter que aguentar maiores tensões e podem surgir problemas de segurança eléctrica. No entanto, o rendimento da electrónica é maior e a necessidade de ataques a *switches* passa para metade. O circuito ocupará, por conseguinte, menos espaço.

2.3.7.1 Proposta de Enrolamento Duplo no Secundário (Energia Unidireccional)

O seguinte gráfico mostra os resultados da simulação acima referida. Estes resultados reforçam a opção tomada (de enveredar pela proposta de ponte-completa, a segunda).

Nesta simulação, usou-se uma fonte de tensão sinusoidal (para emular a rede eléctrica) e um sistema de controlo trivial. Todo o esquemático do circuito está na página posterior.[15]

Figura 48: Simulação da Topologia com Enrolamento Duplo no Secundário

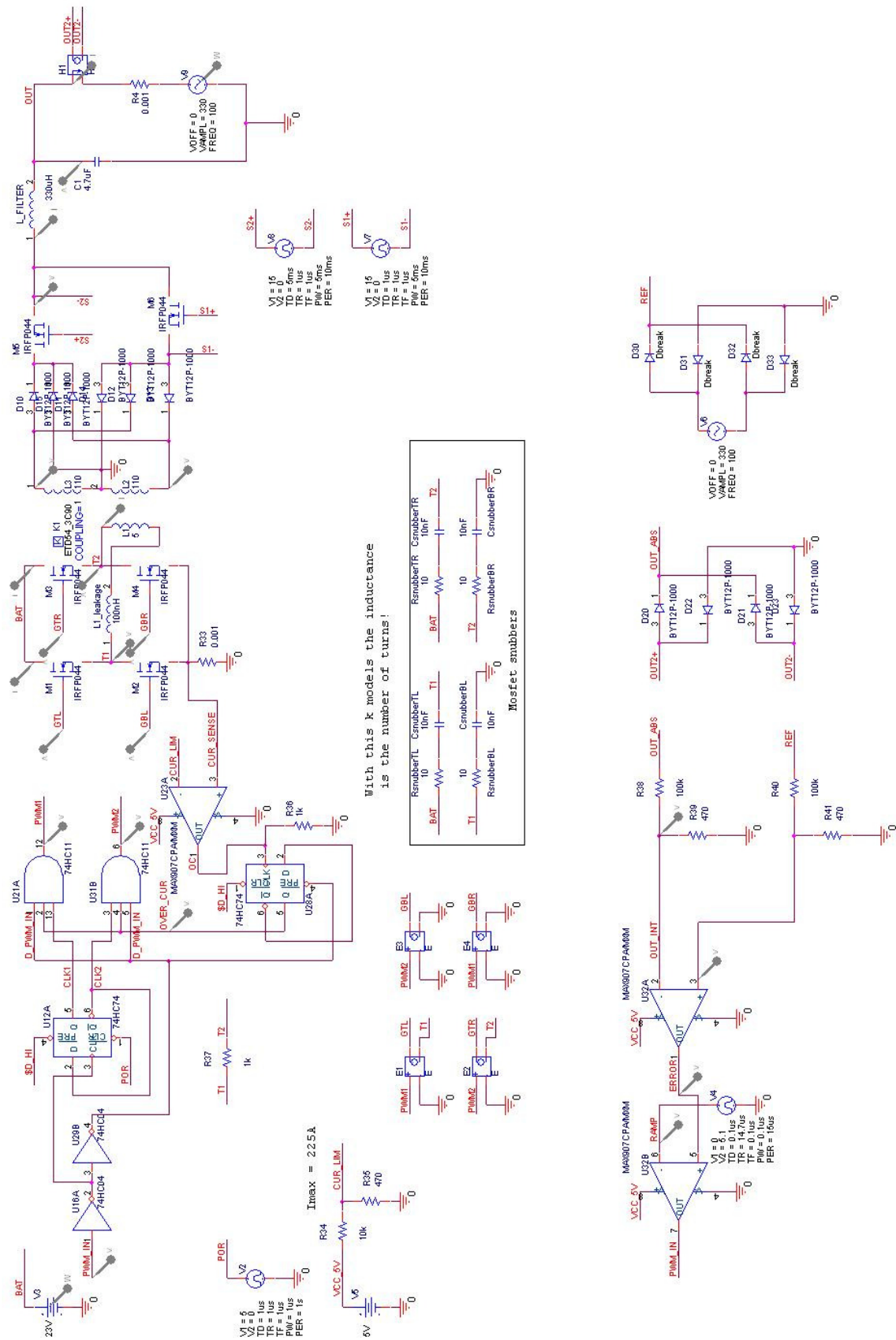


Convém realçar que os *switches* de selecção de arcada não podem comutar sem antes esperar que a corrente na indutância se anule (na simulação nunca há problemas, porque eles não se estragam com sobre-tensões). Regra geral estes comutam próximo do zero da corrente, mas para não haver problemas

numa situação geral, basta esperar umas décimas de microsegundos para garantir que esta é zero. Podemos também por um *snubber* e um diodo zener de protecção para evitar problemas.

Em conclusão, da análise das vantagens/desvantagens das topologias apresentadas, foi decidido implementar a segunda proposta: ponte-completa em ambos os enrolamentos e fluxo de energia unidireccional. A razão dominante foi a questão da segurança eléctrica.

Figura 49: Esquemático do Circuito utilizado para Simulação da Topologia Proposta



3

REGULAMENTAÇÃO SOBRE INVERSORES

Com este terceiro capítulo pretende-se elucidar o estado actual da legislação e homologação de inversores comerciais para produção doméstica de energia eléctrica, quer em regime *stand alone*, quer em regime *grid connected*, bem como lançar um olhar geral ao estado da microprodução em Portugal⁵⁶ e sua evolução.

3.1 MICROPRODUÇÃO EM PORTUGAL

A «Microprodução é a produção de electricidade ou de calor e electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas unidades de microprodução.» *in EDP – Microprodução, Certiel.*

Todas as unidades que disponham de um contracto de compra de electricidade em baixa tensão podem ser produtores de energia eléctrica por intermédio de unidades de microprodução, utilizando recursos renováveis, como energia primária, ou produzindo combinadamente electricidade e calor.

O novo regime simplifica o existente, substituindo-o por um regime de simples registo electrónico, sujeito a inspecção de conformidade técnica. Os produtores entregam a totalidade da energia produzida à rede eléctrica de serviço público mediante um de dois regimes remuneratórios:

- Regime geral, aplicável à generalidade das unidades de microprodução;
- Regime bonificado, para unidades de microprodução com potência de ligação até 3,68kW que utilizem fontes renováveis de energia (solar, eólica, hídrica e biomassa) condicionado:
 - à existência de colectores solares térmicos para aquecimento de água na instalação de consumo, no caso de produtores individuais;

⁵⁶ Indiferenciando a fonte de produção: turbina eólica, painel foto-sensível, fontes térmicas, etc.

- à realização de auditoria energética ao edifício e implementação de medidas, no caso de condomínios.

Entraram recentemente em vigor novas regras e técnicas específicas, das quais a mais relevante é o Decreto-Lei nº 363/2007, de 2 de Novembro, o qual se transcreve em anexo. Interessante para o presente documento é o «*Guia para a certificação da instalação de uma unidade de microprodução*» cujas partes mais relevantes se transcrevem também.

3.1.1 Como ser Microprodutor em Portugal

O sistema sugerido pelo governo português para que qualquer cidadão possa produzir domesticamente energia eléctrica e vendê-la à rede nacional assenta no pressuposto que o futuro microprodutor tenha de contactar e adquirir a uma empresa instaladora certificada pelo estado. Desconhece-se quais os critérios para se constar na lista de Entidades Instaladoras Registadas no Sistema de Registo de Microprodução, não obstante transcreve-se na tabela em anexo 12.1 a dita lista.[12]

Seguem-se os quatro passos aconselhados para “Ser Microprodutor em Portugal”⁵⁷ de acordo com o governo português:

3.1.1.1 Avaliação

- Consulte a oferta de serviços das entidades instaladoras registadas no Sistema de Registo de Microprodução (SRM).
- Solicite propostas comerciais às entidades instaladoras e avalie a rentabilidade do investimento.
- Verifique se cumpre os requisitos previstos na legislação.

3.1.1.2 Registo

- Registe a sua unidade de microprodução no SRM, preenchendo o formulário electrónico e pagando a taxa de registo de instalação de microprodução.

3.1.1.3 Instalação

- Instale a unidade de microprodução, no prazo máximo de 120 dias para não perder o registo.
- Solicite a inspecção no SRM após a conclusão da instalação com vista à obtenção do Certificado de Exploração.

3.1.1.4 Comercialização

- Assine e reenvie o contrato de compra e venda de electricidade que lhe será facultado automaticamente pelo seu comercializador após emissão do Certificado de Exploração.
- Notifique online no SRM a assinatura do contrato. O SRM solicitará automaticamente a ligação da sua instalação à rede pela EDP-Distribuição.
- Com a ligação à rede concluiu o processo e tornou-se um microprodutor de electricidade.

3.2 LEGISLAÇÃO PORTUGUESA SOBRE MICROPRODUÇÃO

Toda a legislação relativa a microprodução energética em Portugal é relativamente recente e referir-se-á a mais relevante neste ponto.

⁵⁷ In programa “Renováveis na Hora”

3.2.1 Regime Jurídico Nacional

O decreto de lei publicado em Diário da República que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de unidades de microprodução é o Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro, o qual está transcrito em anexo 12.2.

3.2.1.1 Portaria nº201/2008 de 22 de Fevereiro

Esta portaria fixa as taxas a cobrar pelos serviços previstos no n.º 1 do artigo 23.º do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de unidades de microprodução.[13]

Nos termos desta Portaria o valor da taxa aplicável em 2009 é:

- a) Taxa de registo da instalação de microprodução: €256.30
- b) Taxa de reinspecção: €153.80

Às taxas previstas acresce o IVA à taxa de 12% e 8%, respectivamente, no Continente e na Região Autónoma da Madeira, para instalações cujas fontes de energia sejam totalmente renováveis, ou à taxa normal, nos restantes casos. A portaria referida encontra-se transcrita em anexo 12.3.

3.2.1.2 Decreto Legislativo Regional nº16/2008/M

Adapta à Região Autónoma da Madeira o Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microprodução. Em anexo em 12.4.

3.2.1.3 Despacho do Director Geral de Energia e Geologia

Têm como objectivo apoiar a implementação do novo regime de produção de energia. Inclui minuta do Termo de Responsabilidade de Execução de Auditoria Energética.

DESPACHO

Nos termos do n.º 3 do artigo 7.º do DL n.º 363/2007, de 2 de Novembro, está previsto a aprovação, mediante despacho do Director Geral de Energia e Geologia, de regras técnicas para apoiar a implementação da produção microprodução, garantindo um adequado funcionamento do sistema.

Assim, nestes termos, dá-se a conhecer ter sido aprovado o seguinte:

- 1 - A alteração do anexo ao supracitado despacho, em virtude de se terem detectado algumas imprecisões do texto inicial, passando a nova minuta de termo de responsabilidade pela execução de auditoria energética a ser conforme com o texto junto.
- 2 - A transição do regime geral para o regime bonificado implica um novo registo, que só poderá ser efectuado no ano seguinte ao do registo no regime geral.
- 3 - No caso de um consumidor rescindir o seu contrato de compra de energia eléctrica, o seu contrato de venda, na qualidade de produtor, é automaticamente rescindido.
- 4 - Após a celebração do contrato de venda de energia eléctrica, a potência contratada como consumidor só poderá ser reduzida até ao dobro da potência de ligação da instalação de produção, para se manter a qualidade de produtor.
- 5 - Enquanto não estiver definido o procedimento para a auditoria energética prevista no ponto iii) da alínea b) do n.º 1 do artigo 9.º, do supra citado diploma, serão aceites termos de responsabilidade de peritos qualificados, conforme minuta em anexo.
- 6 - Os peritos qualificados mencionados no número anterior, são os que estão reconhecidos no Âmbito do Regulamento de Gestão do Consumo de Energia e do Sistema de Certificação de Edifícios.

- 7 - O contrato de venda de energia produzida pela microprodução e o contrato de compra de energia pelo consumidor serão celebrados com o mesmo comercializador.
- 8 - A facturação da energia eléctrica produzida tem a mesma periodicidade da facturação da energia eléctrica consumida.
- 9 - O pagamento da energia eléctrica pelo comercializador a terceiros, previsto no n.º 3 do artigo 12º, será implementado a partir do mês de Setembro de 2008.
- 10 - O limite anual previsto no n.º 7 do Art.º 12.º do D.L. n.º 363/2007, de 2 de Novembro, para a potência de ligação registada no regime bonificado passará a ser repartido em parcelas de 1,5 MW por sessão, sendo as datas de registo devidamente anunciadas no SRM.
- 11 - Quando houver lugar à aplicação do disposto no número anterior o SRM deve informar a nova data e hora para recepção de novos registos.
- 12 - A potência do inversor é caracterizada pela potência nominal de saída.
- 13 - A conformidade dos equipamentos pode ser comprovada pela marcação CE ou por Declaração de Conformidade do fabricante, com excepção do inversor, para o qual é exigido Certificado de Conformidade de produto emitido por organismo de certificação independente.
- 14 - Durante o período entre a data do pagamento da taxa de registo no SRM e a celebração do contrato, não é admitida qualquer alteração das condições associadas ao registo.
- 15 - A energia captada nos colectores solares térmicos previstos no Artigo 9.º n.º 1 alínea a) ponto ii) pode ser utilizada por qualquer tipo de equipamento de aquecimento de transferência de calor para utilização no local da instalação de consumo de electricidade.
- 16 - Quando a unidade microprodução for implementada por um condomínio, os respectivos condóminos têm também direito à isenção do pagamento de IRS.
- 17 - As entidades detentoras de título de registo para execução de instalações eléctricas de utilização de baixa tensão, efectuado nos termos da Portaria n.º 14/2004, de 10 de Janeiro, apenas podem exercer a actividade de instalação de unidades de microprodução desde que obtenham o alvará para execução de instalações de produção de electricidade.
- 18 - A tarifa de venda aplicável a uma unidade de microprodução constituída por mais do que uma tecnologia de energia renovável, é determinado de acordo com a fórmula seguinte:

$$T_v = \frac{2,4(P_s \times T_r) + 4[0,7(T_r \times P_e) + 0,3T_r (P_h + P_b)]}{2,4P_e + 4P_h + P_b}$$

Sendo

T_v – Tarifa de venda

T_r – Tarifa de referência

P_s – Potência solar

P_e – Potência fotovoltaica

P_h – Potência hídrica

P_b – Potência biomassa

19 - A transferência de local de uma unidade de microprodução só é possível nas condições previstas nos n.ºs 2 e 3 do artigo 20.º, do DL 363/07, de 2 de Novembro, isto é, mantendo-se no novo local o mesmo consumidor e o mesmo produtor.

20 - A tarifa de venda de electricidade, prevista no n.º 2 do Artigo 10º do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, a aplicar a todos os microprodutores em regime remuneratório geral cujo comercializador não seja o de último recurso, é igual ao custo da energia da tarifa simples do sistema eléctrico regulado para a BTN de potência contratada menor ou igual a 20,7 kVA.

3.3 INVERSORES HOMOLOGADOS

De acordo com a legislação vigente só os inversores homologados podem ser usados para microprodução em Portugal. A tabela com os inversores autorizados pode ser consultada no anexo 12.5.

Se se pretender instalar um inversor que não conste na tabela referida em anexo, a certificação da instalação de microprodução ficará pendente até que seja apresentado ao SRM o certificado de conformidade do inversor instalado, tal como disposto no artigo 18º do Decreto-Lei nº363/2007 (em anexo): Controlo de Equipamentos.

A potência de ligação solicitada pode ser superior à potência nominal do inversor instalado desde que a potência do inversor instalado seja a mais próxima da potência de ligação disponibilizada pelo fabricante. Ainda relativamente à potência de ligação registada, esta não pode ser inferior à potência nominal do inversor instalado pois a potência de ligação da unidade de microprodução deve ser igual ou superior ao valor da potência nominal do inversor.[12]

3.4 DADOS ESTATÍSTICOS NACIONAIS DE MICROPRODUÇÃO

As tabelas seguintes referem-se ao levantamento estatístico do estado da microprodução em Portugal tendo como fonte o sítio do Ministério da Ciência, da Tecnologia e do Ensino Superior⁵⁸. [12]

Dados estatísticos Microprodução - 2009-09-08				
Regime Bonificado - Tarifa de referência €0,65/kWh				
Fase	Data	Registos Efectuados ⁵⁹	Registos Pagos ⁶⁰	Registos com Pedido de Inspeção

⁵⁸ <http://www.mctes.pt>

⁵⁹ Total de registos efectuados em cada um das fases.

⁶⁰ Total de Registos efectuados (1) deduzidos dos indeferidos pelo SRM por não cumprimento dos requisitos legais ou não pagamento da taxa prevista

		Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)
1ª	2008-04-02	657	2261	374	1307	263	925
2ª	2008-05-05	700	2263	395	1369	287	994
3ª	2008-06-09	641	2164	365	1271	229	799
4ª	2008-07-07	766	2701	394	1391	234	818
5ª	2008-09-09	581	1990	342	1163	234	808
6ª	2008-10-02	777	2657	485	1691	329	1151
7ª	2008-10-29	817	2817	453	1587	344	1209
8ª	2008-11-27	829	2918	436	1543	363	1283
9ª	2009-01-21	816	2857	493	1734	419	1472
10ª	2009-02-17	754	2656	467	1664	353	1360
Total		7338	25294	4205	14720	3085	10819

Tabela 3: Estatística Microprodução 1

Dados estatísticos Microprodução - 2009-09-08							
Regime Bonificado - Tarifa de referência €0,6175/kWh							
Fase	Data	Registos Efectuados ⁵⁹		Registos Pagos ⁶⁰		Registos com Pedido de Inspeção	
		Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)
1ª	2009-04-07	1093	3885	744	2654	402	1431
2ª	2009-06-05	980	3488	660	2344	217	759
3ª	2009-07-10	896	3256	676	2407	59	210
4ª	2009-09-07	981	3483	0	0	0	0
Total		3950	14112	2080	7405	678	2400

Tabela 4: Estatística Microprodução 2

Dados estatísticos Microprodução - 2009-09-08					
Regime Geral					
Registos Efectuados		Registos Pagos		Registos com Pedido de Inspeção	
Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)
190	667	6	29	2	9

Tabela 5: Estatística Microprodução 3

3.5 HOMOLOGAÇÃO TÉCNICA DE INVERSORES

Para que um inversor possa constar na listagem autorizada pelo estado português tem de cumprir normas europeias específicas e para ser comercializado tem de possuir uma declaração de conformidade da CE válida. Neste capítulo referir-se-ão as normas e directivas europeias mais importantes para que um protótipo de inversor possa ser comercializado no nosso mercado, de acordo com o estipulado pela

Comissão Europeia. O IEC⁶¹ tenta uniformizar as normas europeias e americanas para que dispositivos electrónicos fabricados em qualquer país membro possam ser comercializados e instalados em qualquer outro país membro do IEC. Em Portugal basta respeitar as normativas do CENELEC⁶² (representado em Portugal pelo Instituto Português da Qualidade, do Ministério da Economia e da Inovação) para completa homologação de um inversor.

3.5.1 Normas Gerais — CENELEC CLC/TC 8X

Como se trata de um dispositivo eléctrico, este terá primeiramente de estar em conformidade com as regras para aparelhos eléctricos e electrónicos vigentes. Essa normalização é a CENELEC CLC/TC 8X: *Systems aspects of electrical energy supply*. É equivalente/baseado (para o IEC) ao IEC TC 8 cujo enfoque é regulamentar as “entradas” e “saídas” da rede eléctrica (*connection points*).[14]

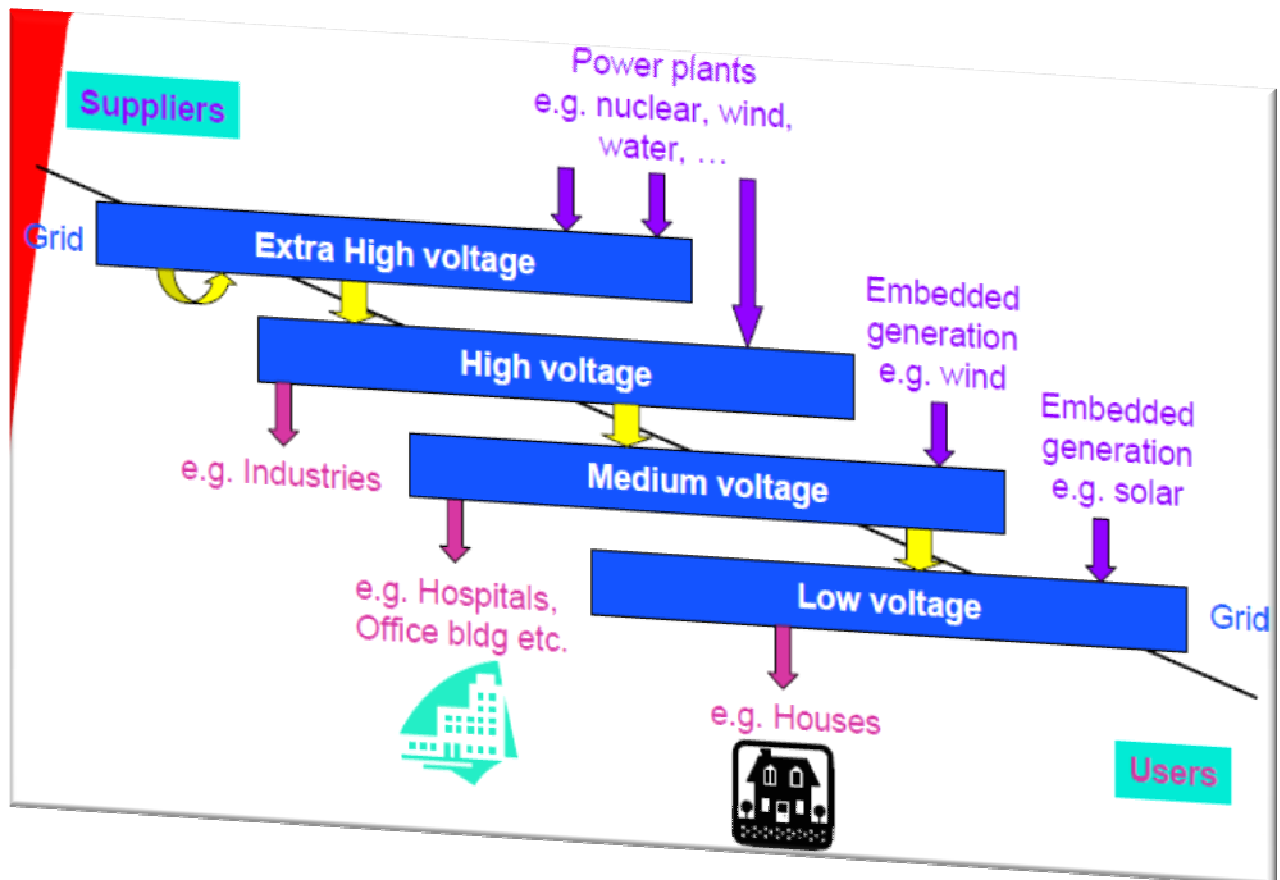


Figura 50: Pictograma do IEC TC8

Esta norma é a que regulamenta as unidades de Micro-CHP, Micro Combined Heat and Power, desde motores de combustão a *fuel cells* (desde que não ultrapassem uma potência de 16A por fase @ 230V).

Foca-se principalmente em conceitos de Qualidade da Potência:

- Qualidade da sinusóide
- Factor de potência
- *Flicker*

⁶¹ International Electrotechnical Commission, <http://www.iec.ch/>

⁶² Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, <http://www.cenelec.eu>

- Injecção DC
- Compatibilidade electromagnética (EMC), etc.

Também em aspectos de segurança:

- Comportamento em condições anormais de tensão ou frequência.
- *Shutdown* obrigatório se detectado desequilíbrio superior a 25% geração/carga.
- Não regulamenta especificamente contra fenómenos de *anti-islanding* quando a carga é a esperada.

Foi o CENELEC CLC/TC 8X que abriu caminho para o regime vigente hoje em Portugal, o conceito de *Fit&Inform*: equipamento *standardizado* e homologado depois de adquirido pode imediatamente ser instalado, conectado e autorizado a *microproduzir* pelos instaladores licenciados oficiais sem envolvimento directo da REN ou EDP; em grande parte da Europa, ao contrário dos países americanos (EUA, Canadá) onde a presença de um “inspector electrotécnico” é indispensável. Instalação primeiro, notificação à companhia depois: *Fit&Inform*.

Os inversores sem transformadores de isolamento possuem um regime legislador específico para eles e não são abrangidos pelo CENELEC CLC/TC 8X.

3.5.2 Norma DIN VDE 0126-1-1:2006

De todas as normativas europeias sobre inversores esta é a mais importante, DIN VDS 0126-1-1:2006 *Automatic disconnection device between a generator and the public low-voltage grid*. Esta norma revista em 2006, deriva do Instituto alemão *Deutsches Institut für Normung*, DIN e estabelece os requisitos para um interface de interrupção automática AC eliminando a necessidade de um grande interruptor externo acessível.



Figura 51: Interruptor Externo

Esta norma permite três modos distintos de corte Inversor-Rede e monitorização de rede:

- Medição de impedância: monitorização de impedância na rede procurando mudanças de carga súbitas.

- Monitorização de tensão trifásica: métodos de monitorização passiva da rede usados para monitorização de redes monofásicas. Medições da tensão no condutor externo desligam o sistema no evento de falha de tensão ou falha de fase.
- Métodos alternativos: por exemplo um circuito de teste redundante em que com um oscilador à frequência da rede simula o pior cenário possível de *islanding* com óptimo ajuste da carga.

O valor de limiar (*threshold*) de variação brusca de carga para corte do inversor é de 1 Ohm ou mais; antes da revisão de 2006 era de meio Ohm. Tal como a potência máxima permitida antes da revisão era de apenas 4.6kVA ligada à rede pública.

3.5.3 Outras Directivas e Normas Europeias Relevantes

Com vista à produção do protótipo do inversor, seguem-se algumas outras normas que terão de ser cumpridas relativas a dispositivos electrónicos:

- Directiva Europeia 2006/95/CE — Instalações Eléctricas de baixa tensão
- Directiva Europeia 2004/108/CE — Compatibilidade Electromagnética

3.5.3.1 Normas Europeias e Respectivas Modificações

- EN 50178:1997 — Equipamento electrónico para uso em instalações eléctricas
- EN 61000-3-2:2006 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Limites de emissões (Corrente não superior a 16A por fase)
 - EN 61000-3-3:1995 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Limitação de mudanças abruptas de tensão, flutuações de tensão e *flicker* em rede pública (Corrente não superior a 16A por fase e conexão não condicional)
 - EN 61000-3-11:2000 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Limitação de mudanças abruptas de tensão, flutuações de tensão e *flicker* em rede pública (Corrente menor a 75A e conexão condicional)
 - EN 61000-3-12:2005 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Limites de emissões (Corrente maior que 16A e não superior a 75A por fase)
 - EN 61000-6-2:2005 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Imunidade em ambientes industriais
 - EN 61000-6-3:2007 — Compatibilidade Electromagnética (EMC), Emissões *standard* em ambientes residenciais, comerciais e de indústria ligeira
 - EN 50366:2003 — Electrodomésticos e aparelhos eléctricos similares: Métodos de avaliação e medição

4

PROJECTO DE HARDWARE DE POTÊNCIA

4.1 PROJECTO DE TRANSFORMADORES E INDUTÂNCIAS

O uso de circuitos magnéticos para transferência de energia tem vindo a sofrer alterações ao longo do tempo, nomeadamente no que se refere à frequência de utilização. Hoje em dia, devido ao facto de gerar aplicações mais compactas, a comutação a alta-frequência⁶³ dos circuitos magnéticos é a tendência futura.

4.1.1 A Indutância

Sempre que num circuito haja oscilações de corrente ocorrem fenómenos de indução magnética. A variação da corrente num circuito causa variação do fluxo do campo magnético com origem nessa mesma corrente e essa variação de fluxo, de acordo com a lei de Faraday origina uma força electromotriz induzida. A correspondente corrente induzida é tal que tende a contrariar a variação de corrente que ocorreu. Por exemplo se a corrente cresce, a corrente induzida é em sentido contrário e aquele crescimento é mais limitado. E vice-versa. Diz-se que qualquer circuito sofre auto-indução criando uma tensão

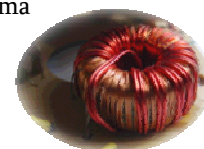


Figura 52: Bobine Simples

⁶³ É de notar aqui que altas-frequências é um termo relativo.

que se opõe à tensão aplicada.

A existência de uma auto-indução leva a que uma corrente não possa variar dando saltos bruscos. A variação da corrente num circuito é contínua. Pode fazer-se uma analogia com os sistemas mecânicos, dizendo-se que os circuitos apresentam uma inércia. A existência de uma auto-indução leva a que uma corrente não possa variar por saltos bruscos. A variação da corrente num circuito é contínua. Tal como a velocidade de uma partícula, a intensidade também é uma função contínua. Resumindo, pela lei de Lenz⁶⁴ (ou lei da indução electromagnética), sempre que o fluxo magnético num circuito eléctrico fechado varia, aparece uma força electromotriz proporcional a essa variação que se opõe.[28]

A lei de Lenz diz que a corrente eléctrica induzida num circuito fechado por um campo magnético, é proporcional ao número de linhas de fluxo que atravessa a área envolvida do circuito, por unidade de tempo:

$$\oint_c \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Simplificando: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

Em que \mathcal{E} é a força electromotriz [em V] e Φ_B é o campo magnético [em Wb⁶⁵].

Chama-se fluxo magnético que atravessa uma superfície plana, colocada num campo magnético uniforme, ao produto do módulo de indução magnética, pela área da superfície, pelo co-seno do ângulo que a normal à superfície faz com a direcção do campo:

$$\Phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

Simplificando: $\Phi_B = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$

Em que $\mathbf{B} \perp \mathbf{A}$, \mathbf{B} uniforme.

Uma vez que fluxo é proporcional à corrente, admitindo que a configuração do circuito não varia, temos para uma indutância genérica:

$$v(t) = L \frac{di}{dt}$$

Em que L , é o coeficiente de auto-indução.

Características da indutância ideal:

- O coeficiente de auto-indução é constante.
- O fluxo magnético gerado não é partilhado com mais nenhum elemento.
- A corrente que percorre os enrolamentos é constante ao longo do enrolamento (elemento de parâmetros concentrados).

⁶⁴ Heinrich Lenz: físico, químico e teólogo Russo, especialista em magnetismo. Formulou a lei homónima e a lei de Joule.

⁶⁵ Webber, unidade SI do fluxo magnético.

- Não existem perdas por efeito de joule nem magnéticas.

Uma indutância, constrói-se usualmente com uma bobine de um material condutor, por norma fio de cobre enrolado à volta de um núcleo seja de ar ou de um material ferromagnético. O núcleo pode ser constituído por um material com uma permeabilidade mais alta que o ar, confinando assim o campo magnético junto à indutância, aumentando-a portanto. Indutâncias estão presentes em varias formas e feitios no mercado, mas a maioria é construída com um fio revestido (de um material isolante) à volta da do núcleo de ferrite com o fio do lado de fora, enquanto outras encapsulam o fio completamente na ferrite e são chamadas *shielded*. Certo tipo de indutâncias possui um núcleo ajustável, que permite a substituição da mesma com mais facilidade. As indutâncias usadas para bloquear altas frequências são muitas vezes feitas com o fio a atravessar a ferrite.

Pequenas indutâncias podem ser gravadas directamente em PCB⁶⁶ apenas marcando a pista num padrão espiralado. Algumas, como as indutâncias planares, usam núcleos planares. Indutancias de baixo valor podem ser associadas em circuitos integrados usando os mesmos processos que se usam para fabricar transistores. Nestes casos, as inter-ligações são feitas com base em alumínio (ou ligas de alumínio). No entanto, razões de ordem prática (em circuitos integrados) fazem com que as indutâncias (quando pequenas) sejam substituídas por um circuito do tipo *gyrator*⁶⁷, que usa um condensador e OPAMPs (ou outros componentes activos) para emular o comportamento de uma indutância.

Segue-se uma tabela usada no dimensionamento de indutâncias.[29]

CONSTRUÇÃO	FÓRMULA	DIMENSÕES
Bobine Cilíndrica	$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$	L = indutância [H] μ_0 = permeabilidade vazio = $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m] μ_r = permeabilidade relativa núcleo [H/m] N = número de espiras A = área da secção núcleo [m ²] l = comprimento núcleo [m]
Fio Condutor Direito	$L = l \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 \right) \cdot 200$	L = indutância [nH] l = comprimento do condutor [m] d = diâmetro do condutor [m]
Bobine Cilíndrica de núcleo de ar (curto)	$L = \frac{25,4 \cdot r^2 N^2}{9r + 10l}$	L = indutância [mH] r = raio exterior da bobine [m] l = comprimento da bobine [m] N = número de espiras
Bobine de núcleo de ar (multi camada)	$L = \frac{20,32 \cdot r^2 N^2}{6r + 9l + 10d}$	L = indutância [mH] r = raio médio da bobine [m] l = comprimento do enrolamento bobine [m]

⁶⁶ Do inglês, *Printed Circuit Board*, circuito impresso.

⁶⁷ Ou inversor de impedância positiva

Bobine de núcleo de ar (plano e em espiral)	$L = \frac{r^2 N^2}{(2r + 2,8d) \times 10^3}$	$N =$ número de espiras
		$d =$ raio ext. menos raio int. bobine [m]
Núcleo Toroidal (de secção circular)	$L = \mu_0 \mu_r \frac{N^2 r^2}{D}$	$L =$ indutância [H]
		$r =$ raio médio da bobine [m]
		$N =$ número de espiras
		$d =$ raio ext. menos raio int. bobine [m]
		$L =$ indutância [H]
		$\mu_0 =$ permeabilidade vazio = $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]
		$\mu_r =$ permeabilidade relativa núcleo [H/m]
		$N =$ número de espiras
		$r =$ raio do enrolamento da bobine [m]
		$D =$ diametro geral do toróide [m]

Tabela 6: Fórmulas Usuais para Cálculo Teórico a Indutância de Algumas Construções de Bobines

4.1.2 O Transformador

4.1.2.1 Transformador de Isolamento

Para tratar da questão do isolamento galvânico, ou seja, ter dois circuitos eléctricos que transferem energia entre si, mas estão isolados electricamente, usa-se um transformador.

Sempre que dois circuitos eléctricos partilham linhas de fluxo, existem pela lei de Lenz, forças electromotrizes que se opõem à variação do fluxo provocado tanto pelo próprio circuito como pelo circuito vizinho. Para quaisquer dois circuitos nessas condições:

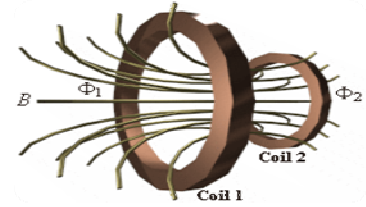


Figura 53: Circuitos que Partilham o Mesmo Fluxo Magnéticos

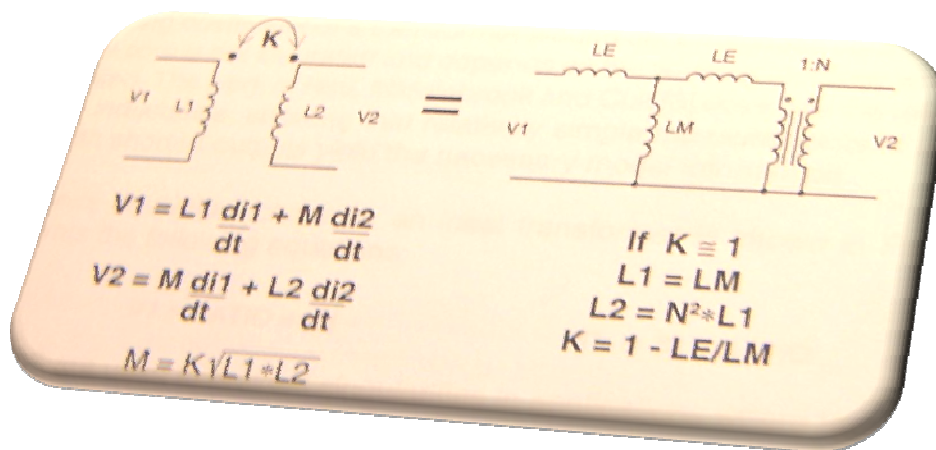


Figura 54: Modelo de Baixas Frequências para um Transformador Ideal

As relações das tensões nos enrolamentos são dadas por:

$$V_1 = L_1 \left(\frac{\partial i_1}{\partial t} \right) + M \left(\frac{\partial i_2}{\partial t} \right)$$

$$V_2 = L_2 \left(\frac{\partial i_2}{\partial t} \right) + M \left(\frac{\partial i_1}{\partial t} \right)$$

Com,

$$M = K \sqrt{L_1 \times L_2}$$

Coeficiente de acoplamento entre duas bobine ideais, $K = 1$.

Este processo torna possível a transferência de energia entre dois circuitos isolados electricamente. Considere-se o caso em que duas bobinas partilham o mesmo fluxo magnético (caso do

transformador ideal, em que o acoplamento é unitário entre elas). Quando se diz que partilham o mesmo fluxo magnético quer dizer que as linhas de campo que passam pelo núcleo de uma bobina passam pela outra. O fluxo total no circuito vem multiplicado pelo número de espiras. A bobina onde é aplicada energia é o primário e a outra corresponde ao secundário.

Uma vez que o fluxo magnético que as atravessa é igual, as tensões induzidas pela sua variação vão ser directamente proporcionais à relação entre espiras. Quando a corrente de magnetização é nula (coeficiente de auto-indução é infinito), temos que a potência introduzida no primário é totalmente transferida para o secundário do transformador, resultando que a corrente no secundário é inversamente proporcional à corrente do primário com o factor igual à relação entre o número de espiras.

Uma outra forma de ver isto é reparar que, a variação do fluxo magnético é dada pela tensão aplicada ao primário e uma corrente variável provoca um fluxo proporcional à corrente. Então, “retirar” uma corrente no secundário, implica introduzir uma corrente no primário que gera um fluxo que contrarie o gerado pela corrente no secundário, de modo a continuar a satisfazer a lei de Lenz no que respeita à tensão.

Devidos às relações anteriores, o transformador também pode ser visto como um adaptador de impedâncias. As relações das tensões, correntes e impedâncias são:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

$$I_2 = I_1 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)$$

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2$$

Em que Z_1 é a impedância do secundário vista do primário.

As características de um transformador ideal⁶⁸ são:

- Resistência eléctrica dos enrolamentos nula;
- Material constituinte do núcleo sem histerese;
- Perdas no núcleo nulas (por efeito das correntes de Foucault⁶⁹).
- Acoplamento magnético entre bobinas perfeito ($K=1$), isto é, não há fluxo de dispersão: o fluxo está todo contido no núcleo e concatena-se totalmente com as espiras do primário e do secundário;

Como explicado previamente, As Leis de Faraday, de Lenz e de Ohm estabelecem a existência e os sentidos das forças electromotrizes induzidas e das correntes. Em particular, no transformador ideal:

- A Lei de Lenz estabelece que a força electromotriz e a corrente induzidas no secundário são tais, que as linhas de força aí geradas contrariam o fluxo magnético estabelecido pelo primário;

⁶⁸ Genericamente: duas bobinas acopladas através de um núcleo de elevada permeabilidade magnética.

⁶⁹ Corrente de Foucault (ou corrente parasita): nome dado à corrente induzida num condutor quando o fluxo magnético através de uma amostra razoavelmente grande de massa metálica.

- A Lei de Faraday estabelece a existência de forças electromotrizes induzidas no primário e no secundário (os fenómenos da indução electromagnética e da indução mútua);
- A Lei de Ohm estabelece a presença de uma corrente no secundário, caso aos terminais deste se encontre ligada uma impedância.

4.1.2.2 Dimensionamento de Núcleos

Tanto para o transformador como para a indutância, o uso de materiais ferromagnéticos que reforçam o campo magnético serve para concentrar as linhas de fluxo em circuitos magnéticos e aumentar o seu valor. Os valores de fluxo gerados com a mesma corrente sobem pelo factor μ_r , permeabilidade⁷⁰ relativa do material.



Figura 55: Núcleo em C

Permeabilidade do vazio (próxima da do ar): $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

Permeabilidade absoluta do material: $\mu = \mu_r \mu_0$

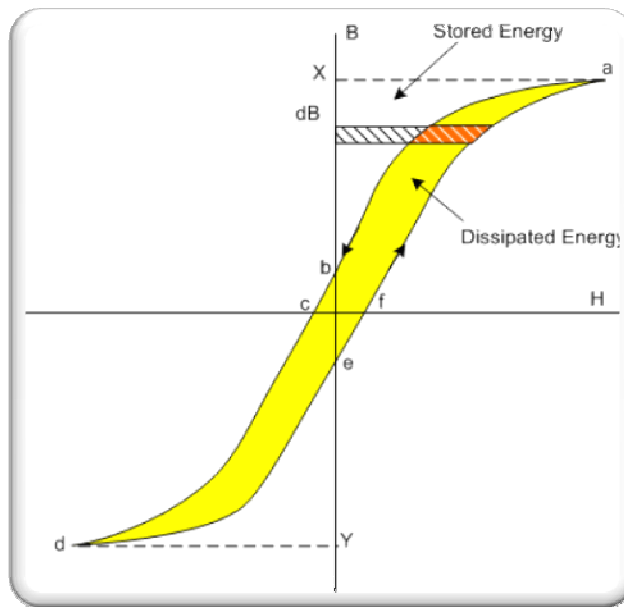
Campo magnético: $B = \mu \cdot H$, com H excitação magnética

É isso que nos dá a possibilidade de ter indutâncias elevadas, transformadores com baixas correntes de magnetização e pouco fluxo de fugas. Sem o uso de tais materiais (de permeabilidade maior que a do ar) os circuitos seriam menos estanques (interagiam mais com o exterior).

No entanto o problema em relação ao uso de tais materiais é que esse reforço apenas corresponde a um factor linear para pequenos valores de excitação magnética. Mais ainda, estes materiais gastam energia para se alinharem com o campo aplicado. A energia gasta por ciclo de magnetização e por unidade de volume de material é proporcional à área da curva de histerese do material. Para garantir que μ é alto e aproximadamente constante, temos que garantir que o campo de indução B fica abaixo do valor de saturação.

⁷⁰ Permeabilidade ou permissividade.

Figura 56: Perdas por Histerese num Núcleo Normal de um Transformador



Tentando explicar as perdas por histerese, pode dizer-se que os materiais magnéticos podem ser vistos como sendo compostos por numerosos pequenos “domínios” magnéticos, cada um com o seu respectivo pólo norte e pólo sul. Normalmente esses domínios estão orientados aleatoriamente de modo a que os efeitos de cada um dos pequenos magnetos se cancelem: o material não exhibe comportamento magnético. No entanto quando surge uma força magnetizadora, H , que é aplicada ao núcleo, os domínios tendem a alinhar-se com ela, e os seus contributos de campo magnético tendem a somar-se. Se se aumentar a força magnetizadora de tal ordem causando que todos os domínios fiquem alinhados com esta, o material diz-se saturado. Amplificar a força aplicada a partir deste ponto causa apenas um pequeno aumento de fluxo no núcleo.

Quando a tensão aplicada ao primário é positiva, o fluxo magnético aumenta e segue o caminho (no gráfico) pelos pontos [d-e-f-a]. Análogamente, quando a tensão aplicada é negativa, o fluxo segue o caminho [a-b-c-d], porque a energia é dissipada na rotação dos “pequenos domínios magnéticos” do núcleo. É este o efeito de histerese: há dois valores de fluxo para cada valor de força magnetizadora, dependendo da direcção dessa força.

O *loop* formado pelo efeito de histerese no núcleo é chamado *loop B-H*, e a sua área representa as perdas de energia (por histerese). A área formada por [a-X-b-a] representa a energia magnética armazenada no núcleo que será dissipada em cada comutação (região a laranja).

As equações necessárias para dimensionamentos são as que se seguem.

Permeabilidade relativa para um circuito magnético com *gap*:

$$\mu_g = \frac{\mu_r}{1 + \frac{\mu_r l_g}{l_m}}$$

Com: l_g comprimento do *gap*.

l_e comprimento efectivo do circuito magnético.

μ_r permeabilidade efectiva do circuito magnético.

Coefficiente de auto-indução de uma bobine:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l}$$

Campo por indução magnética no centro de uma espira:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 NI}{l}$$

Fluxo magnético no núcleo:

$$\Phi_B = B \cdot A$$

Lei de Lenz:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

4.1.2.3 Núcleos de Indutâncias

Para que a indutância seja constante, não tenha perdas excessivas e seja relativamente estanque é necessário garantir que em todas as situações de utilização o campo no núcleo não excede um determinado valor máximo, que deve ser inferior ao valor de saturação do núcleo. Há que garantir que para a máxima corrente que percorre a indutância, o núcleo não satura. Temos que trabalhar com as seguintes relações:

Coefficiente de auto-indução numa bobine:

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 A}{l}$$

Campo por indução magnética no centro de uma espira:

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 NI}{l}$$

Número máximo de espiras:

$$N_{max} = \frac{B_{max} \cdot l_e}{\mu_r \mu_0 I_{max}}$$

Tem que se diminuir a permeabilidade do núcleo (por exemplo, fazendo um *gap*) e/ou aumentar a área efectiva até que se consiga fazer uma indutância com o valor pretendido. Fazer um *gap* reduz a permeabilidade equivalente (efectiva) no núcleo, μ_r . Como o campo no núcleo varia com N e a indutância com N^2 , é possível fazer indutâncias maiores.

4.1.2.4 Núcleos de Transformadores

No transformador, a situação é semelhante à da indutância. Se possuir um acoplamento muito bom, a única corrente que provoca fluxo magnético é a corrente de magnetização.

O dimensionamento de um núcleo de um Flyback é semelhante ao dimensionamento de um núcleo de uma indutância. Nos casos de uso do transformador usado em modo de condução (a sua função não é armazenar energia), é mais rápido pensar no valor máximo do fluxo gerado pela tensão aplicada, aplicando a lei de Lenz:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}, \text{ com fluxo magnético dado por: } \Phi_B = B \cdot A$$

Para calcular o fluxo máximo atingido integramos ambos os lados da equação da lei de Lenz. Para um dado valor de área efectiva do núcleo e campo máximo admissível corresponde um número mínimo de espiras, N .

Normalmente, o dimensionamento é feito de modo a manter o número de espiras N , e a área efectiva do núcleo do transformador A , necessárias apenas para não se exceder um valor máximo de B . Isto reduz o circuito ao menor tamanho e possivelmente ao mínimo custo. Se a corrente de magnetização máxima admissível for outra condicionante, pode ser necessário usar mais espiras ou aumentar a área do núcleo.

Aumentar o número de espiras ou a área do núcleo conduzem a diferentes benefícios. Por um lado tem-se mais volume no circuito magnético e mais perdas magnéticas e uma indutância de magnetização menor. Por outro lado tem-se mais perdas no cobre⁷¹.

É necessário saber qual a secção necessária para a bobinagem⁷² (normalmente admite-se uma determinada eficiência de enchimento, por exemplo relação de 0.4). A bobinagem tem que cumprir algumas regras de segurança no que respeita a espaços e isolamento e deve tomar em consideração os problemas de condução no cobre em alta-frequência, que serão discutidos mais à frente.[16]

⁷¹ O cobre refere-se genericamente aos condutores, o que não significa que o condutor seja obrigatoriamente o cobre (metal).

⁷² Enrolar em bobine.

4.1.2.5 Modelos de Transformador a Altas-frequências

Apresentam-se agora os três modelos eléctricos do transformador. É necessário levar em conta as perdas no cobre e no núcleo. Com o aumentar da frequência há que ter em consideração ainda os efeitos capacitivos. Principalmente nos transformadores redutores, o acoplamento capacitivo entre o primário e o secundário pode ser um problema. Uma maneira de obviar alguns desses problemas consiste em usar um “shield”⁷³ entre os enrolamentos do primário e secundário.[27]

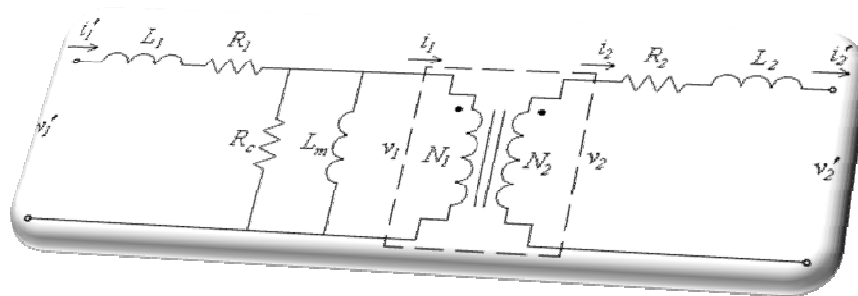


Figura 57: Modelo para Transformador de Baixa-Frequências

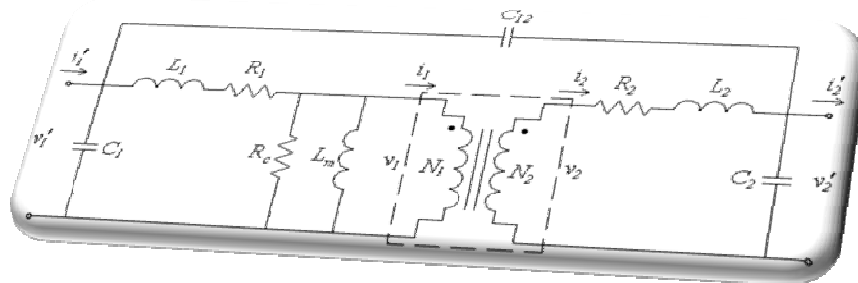


Figura 58: Modelo para Transformador de Alta-Frequências

⁷³ Introduzir um *shield* pode reduzir significativamente o *Insertion Loss* num transformador de alta frequência, porque os efeitos capacitivos são normalmente os factores dominantes em relação a esse parâmetro. O *Insertion Loss* é um termo das telecomunicações e refere-se à atenuação de sinal de um dispositivo numa cadeia de transmissão.

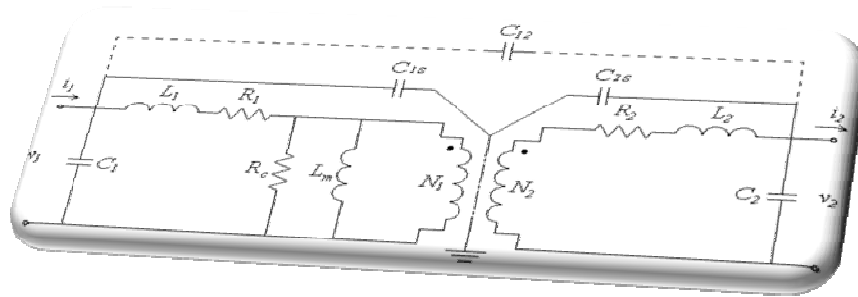


Figura 59: Modelo para Transformador Alta-Frequências com *Shield*

- L_1 indutância de fugas no primário;
- L_2 indutância de fugas no secundário;
- L_m indutância de magnetização;
- As resistências simulam as perdas.

Para muito altas frequências (segunda e terceira propostas) têm que se tomar em consideração os efeitos de propagação e o modelo do transformador tem que ser distribuído.

4.1.2.6 Escolha do Tipo de Transformador

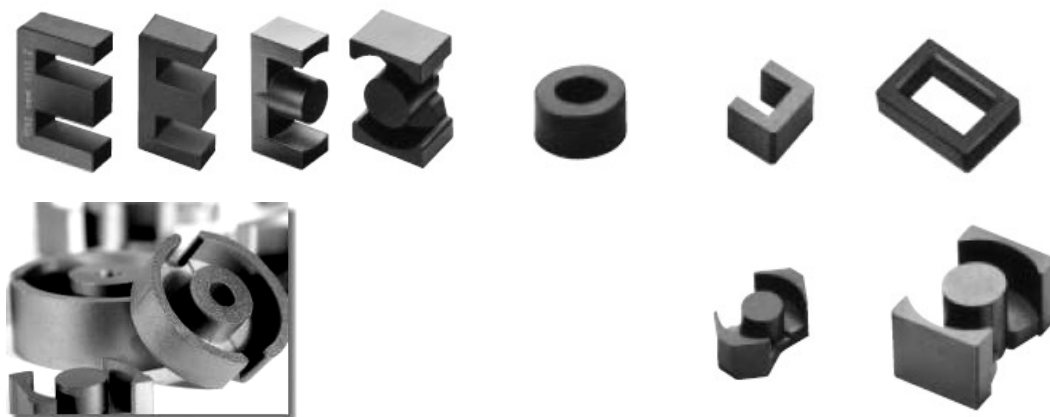
Os materiais dos circuitos magnéticos são em geral ferrites devido ao facto de não serem boas condutoras (e por isso não sofrerem tanto do problema das correntes induzidas). São materiais desenvolvidos para usar em altas-frequências.

Em relação às topologias dos circuitos magnéticos apresentam-se três opções.

4.1.2.6.1 Transformadores Convencionais

Aos técnicas de fabrico já estão desenvolvidas e a montagem é fácil. Desde os núcleos mais simples aos núcleos que optimizam a dissipação de calor e o volume para uma dada área efectiva, passando por núcleos com reduzida emissão de radiação electromagnética, existem inúmeras soluções:

Figura 60: Núcleos Convencionais de Ferrite

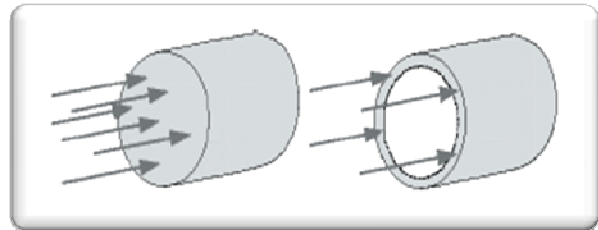


Para aplicações de grande potência o núcleo em E é preferível aos núcleos tipo POT (canto inferior esquerdo da figura acima). Como variantes do núcleo “E” temos os núcleos EC, ETD, PQ e RM.

Estas variantes optimizam algumas características da forma em “E”, como por exemplo a limitação dos efeitos de radiação electromagnética e o melhor acoplamento ao núcleo. As variantes deste tipo de núcleo com zona de bobinagem circular, conseguem um menor comprimento equivalente do circuito magnético para a mesma área efectiva.

No entanto com a evolução das ferrites a permitir ir mais longe na frequência, os efeitos de proximidade e pelicular⁷⁴ começam a fazer aumentar bastante as perdas no cobre e a fazer com que outras abordagens se tornem mais eficientes.

Figura 61: Efeito Pelicular



4.1.2.6.2 Transformador Coaxial

Para frequências mais altas, este tipo de transformadores tem melhor desempenho em relação aos transformadores convencionais. Para

altas-frequências os efeitos das correntes induzidas fazem-se sentir menos (efeito pelicular e de proximidade). Tem grande flexibilidade de ajuste da área do núcleo. Por terem só uma espira no lado de maior corrente são adequados para grandes relações de transformação.

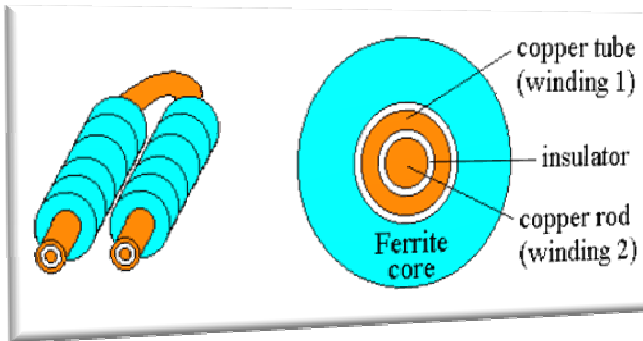


Figura 62: Transformador Coaxial

⁷⁴ O efeito pelicular, é a tendência de uma corrente a altas-frequências se distribuir num condutor de maneira a que a sua densidade próximo da superfície (do condutor) é maior que no interior desse condutor. Isso faz com que a resistência efectiva do condutor aumente com a frequência (da corrente que nele passa).

4.1.2.6.3 Transformador Planar (Circuito Impresso)

Esta tecnologia tem a vantagem de ser compacta e fácil de integrar num circuito feito em PCB. Apesar de para frequências muito altas começa a ser melhor que a tecnologia convencional (pois é a que sofre menos do aumento de resistência devido a efeitos pelicular e de proximidade), esta solução sofre de várias desvantagens, como a menor eficiência de bobinagem (taxa de enchimento); em frequências mais baixas o desempenho é inferior aos transformadores convencionais, devido á fraca eficiência de utilização de espaço na construção de grandes enrolamentos.

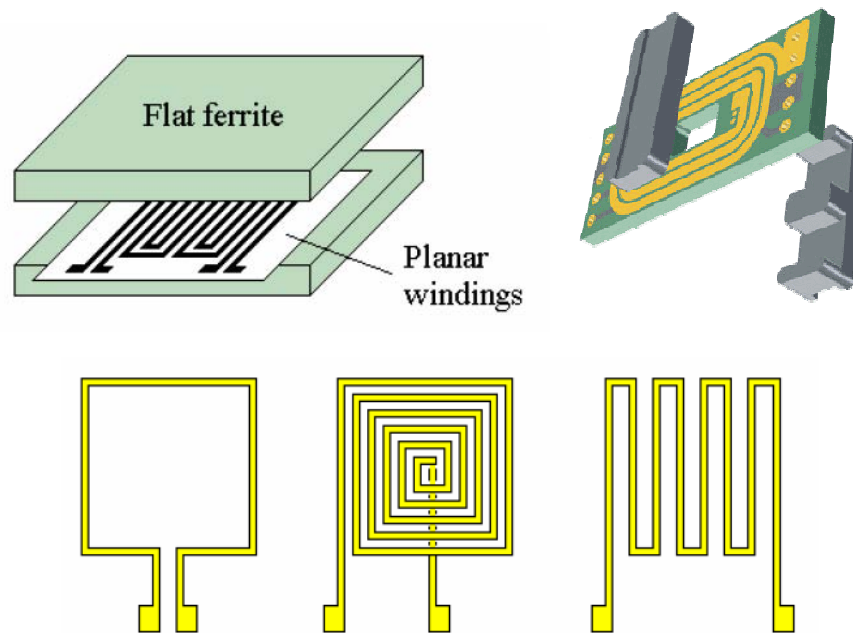


Figura 63: Transformador em Tecnologia Planar

Quanto aos tipos de transformadores e como conclusão é seguro afirmar que quando se privilegia o tamanho e a integração (baixas potências), a tecnologia dos circuitos impressos é talvez a mais indicada. Terá ainda mais potencial quando os materiais dos núcleos melhorarem e com o uso de topologias ressonantes (com perdas de *switching* baixas).

Quando se analisa possíveis aplicações, para maiores potências, a tecnologia dos transformadores coaxiais será também bastante apelativa.

Mas se o objectivo for implementar uma aplicação de potência para as frequências mais comumente utilizadas na actualidade [50KHz – 200KHz], os transformadores convencionais continuam provavelmente a ser a melhor opção.[2]

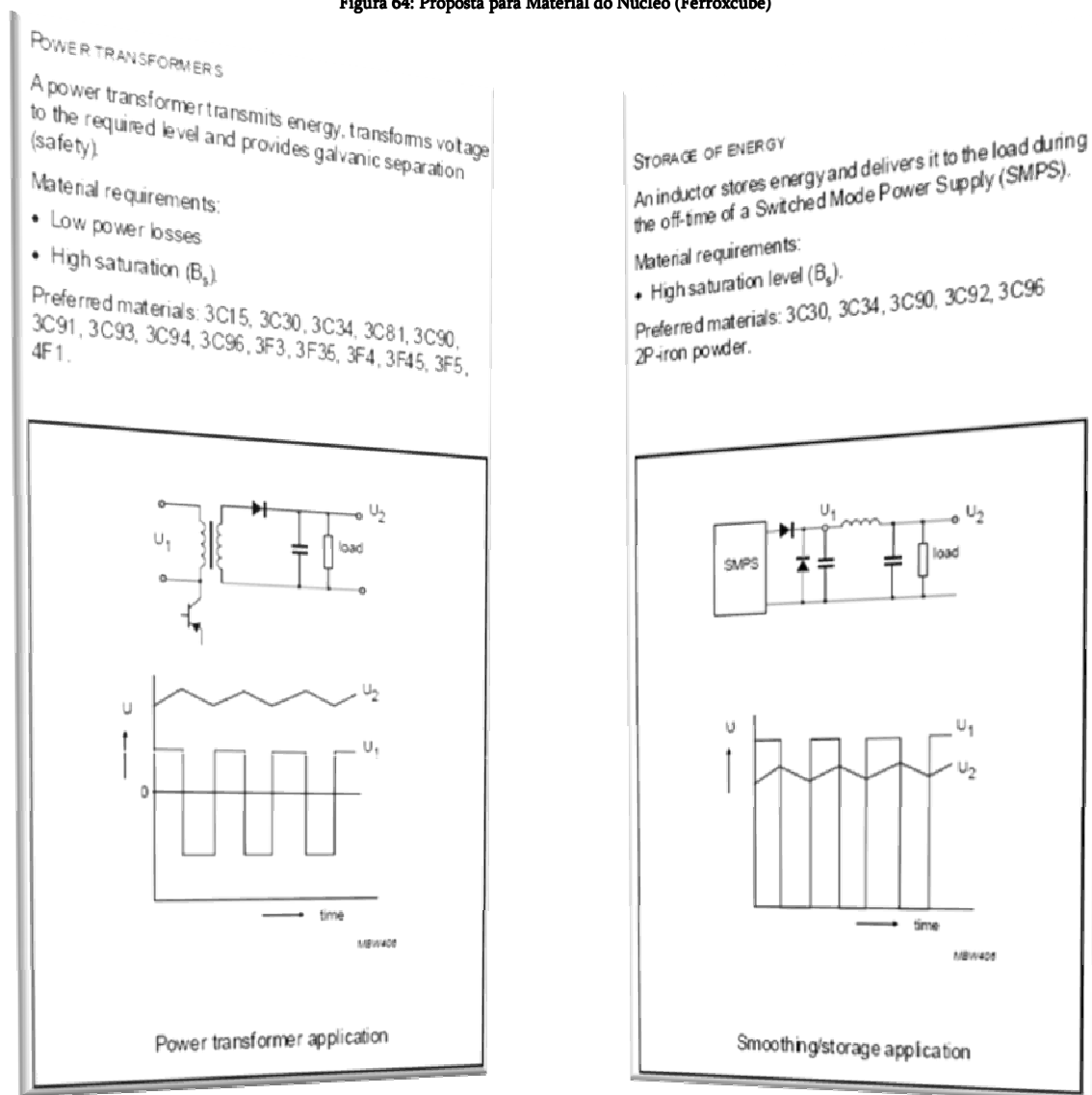
4.1.2.7 Escolha do Material do Núcleo

O material do núcleo deve ser escolhido consoante a aplicação, embora a caracterização do material seja algo complexa (já que pois o conjunto de variáveis é grande), os fabricantes disponibilizam tipicamente uma nomenclatura e modelo matemático que usam depois para caracterizar os materiais.

O recurso a tabelas fornece normalmente uma boa imagem quanto às características do material. Normalmente o fabricante também aconselha os materiais consoante os requisitos da aplicação. Por exemplo, em aplicações de armazenamento de energia, como o caso de um Flyback ou uma indutância de

um Forward, um requisito crucial é o material possuir valores de B_{max} maiores e uma saturação mais suave. Tome-se como exemplo o seguinte excerto dos *datasheets* da *Ferroxcube*⁷⁵: [2]

Figura 64: Proposta para Material do Núcleo (Ferroxcube)



⁷⁵ <http://www.ferroxcube.com/>

Ainda sobre o mesmo material adoptado:

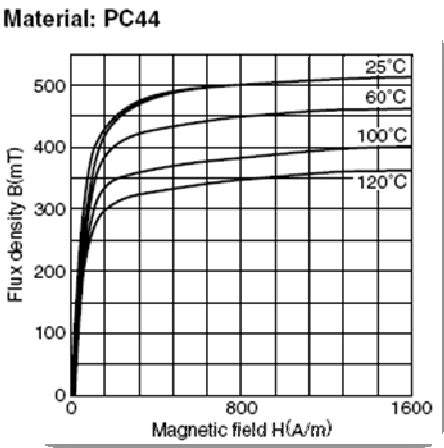
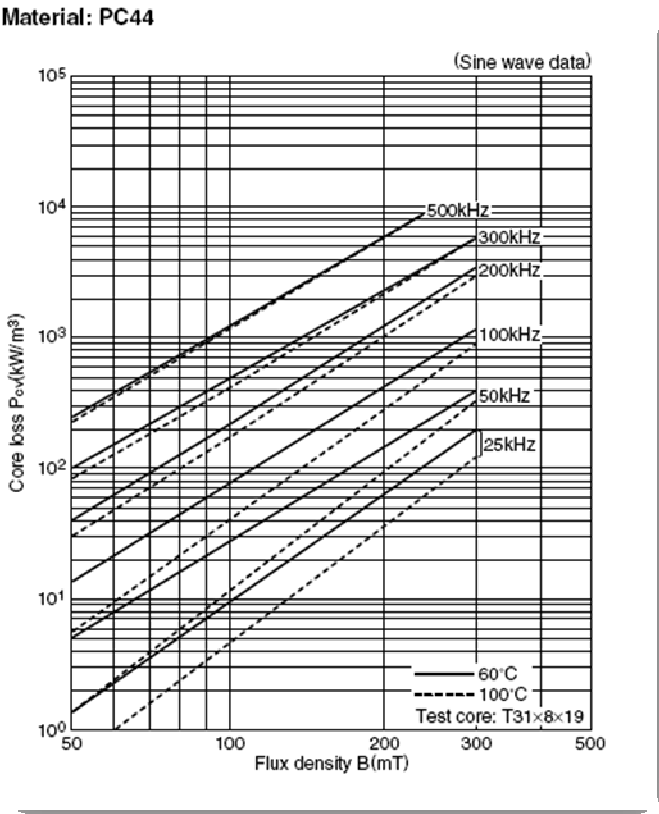


Figura 65: Curvas de Histerese e Perdas para o Material Adoptado para o Núcleo

4.1.2.8 A Bobinagem: Problemas com as Correntes Induzidas

Em frequências altas, as perdas no cobre aumentam bastante. Isto deve-se ao efeito das correntes induzidas, que dão origem ao efeito pelicular e ao efeito de proximidade. Com o aumento da frequência a corrente e o campo magnético no interior do condutor tendem a anular-se, pois são geradas correntes e contra campos pelos *loops* de tensão induzidos. De notar que a corrente é um efeito associado ao campo magnético⁷⁶.

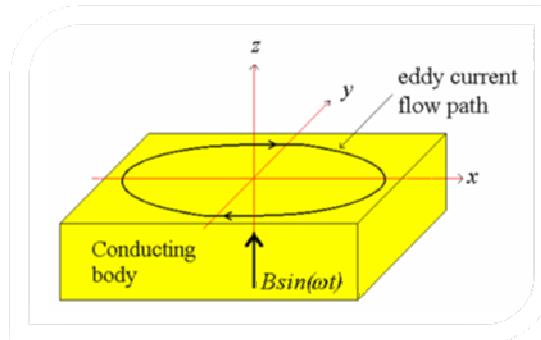


Figura 66: Correntes Induzidas (Eddy Currents)

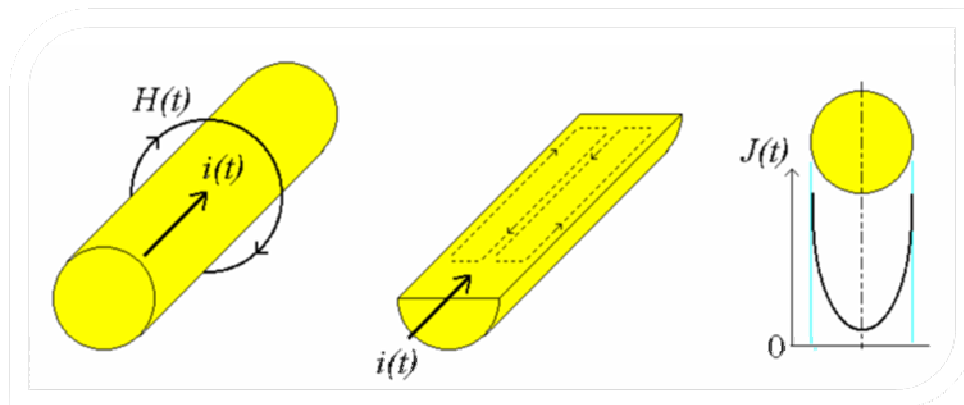


Figura 67: Efeito Pelicular⁷⁷

Matematicamente falando (em cálculos simplificados) quando a corrente circula praticamente toda numa camada muito próxima da superfície, considera-se que a corrente circula apenas D_{pen} para dentro do condutor, em que D_{pen} é a profundidade de penetração no cobre:

$$D_{pen} = \frac{75}{\sqrt{f}}, \text{ em [mm]}$$

⁷⁶ Um campo magnético está sempre associado a uma corrente e/ou a um campo eléctrico variável (resultado das equações de Maxwell). Num condutor só flui corrente no seu interior se existir um campo magnético associado a esse efeito.

⁷⁷ Já explicado anteriormente.

Consequência das correntes induzidas é que a corrente tende a circular na parte externa do condutor: efeito pelicular.

Quando aproximamos dois condutores com correntes contrárias, a corrente passa a circular só numa face destes. Estamos sob um efeito de proximidade (como a figura ilustra). As correntes induzidas opõem-se nas faces exteriores e somam-se nas faces interiores.

Uma maneira genérica de ver estes fenómenos seria resolver as equações de Maxwell⁷⁸ para o sistema em questão. Felizmente é possível (a partir de outros métodos, estudar estes efeitos) para retirar implicações importantes e recorrer a tabelas de resultados já feitas por outros.

Quando a espessura do condutor é da ordem da profundidade de penetração, o campo magnético tende a anular-se dentro do condutor, porque as correntes induzidas provocam um contra-campo. Estas são mais fortes quanto mais aumenta a frequência (lei de Lenz).

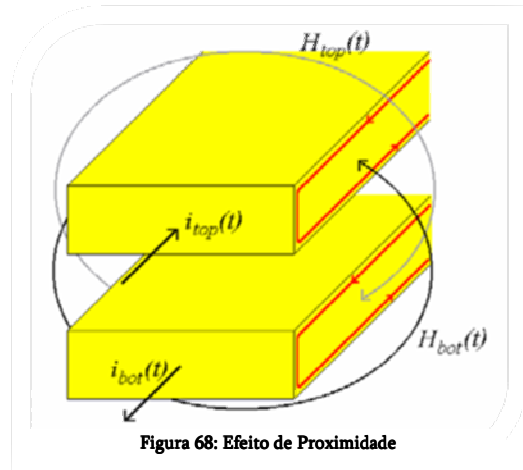


Figura 68: Efeito de Proximidade

A FMM (força magnetomotriz, da lei de Ampere⁷⁹, enunciada mais abaixo) é o análogo da FEM (força electromotriz) do campo eléctrico. Pode dizer-se que é a capacidade de criar campo magnético. Desprezando o campo de magnetização, o campo magnético apenas existe entre as camadas dos enrolamentos e anula-se quando se chega ao núcleo (relembrar que as correntes dos dois enrolamentos do transformador geram fluxos magnéticos que se anulam).

A lei de Ampere diz que a força magnetomotriz total ao actuar ao longo de um caminho fechado é igual à corrente que circula nessa malha:

$$F = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{\Sigma} = N \cdot I \text{ [A]}$$

Onde F é a força magnetomotriz (em Amperes) na malha de comprimento l (em metros), H é a intensidade do campo (em A/m) e I_{Σ} é a corrente total na malha.[9]

⁷⁸ As equações de Maxwell são um grupo de quatro equações, que descrevem o comportamento dos campos eléctrico e magnético, bem como suas interacções com a matéria.

⁷⁹ André-Marie Ampère: Físico, filósofo e matemático francês. Foi um dos primeiros descobridores do electromagnetismo.

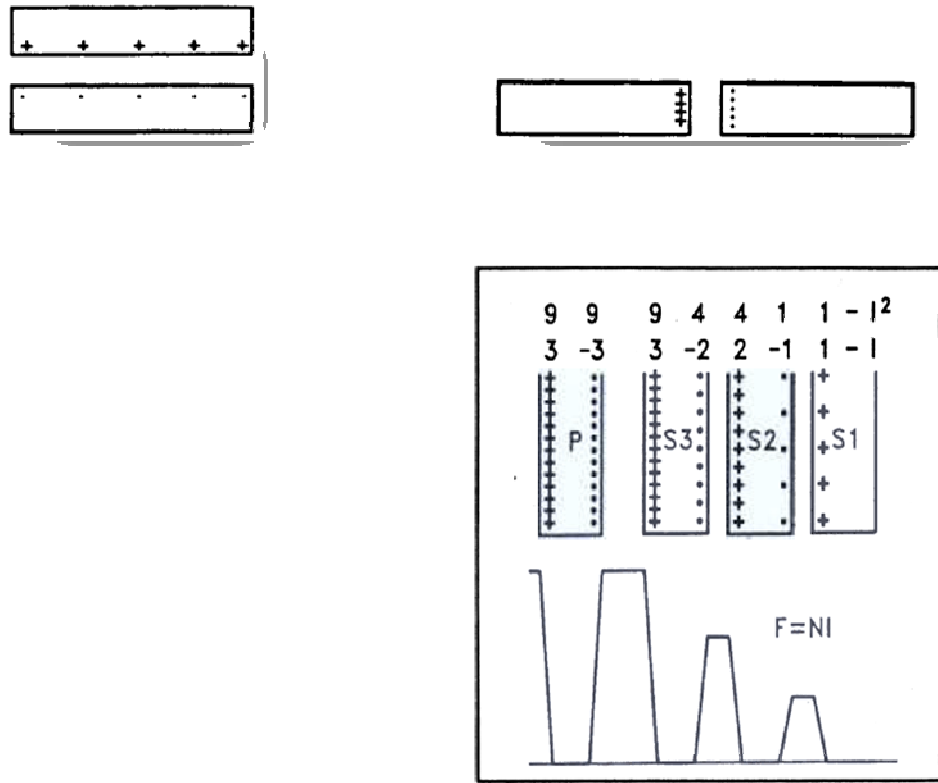
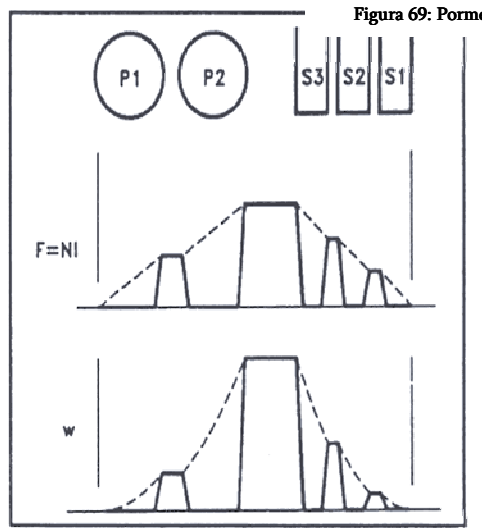


Figura 69: Pormenores do Efeito de Proximidade



Como no centro do condutor não há campo magnético (admite-se que estamos numa situação em que a profundidade de penetração é já razoavelmente inferior à espessura do condutor), a força

magnetomotriz é zero num caminho ao longo do seu interior. Então existem correntes (que apenas geram dissipação) que fazem com que a força magnetomotriz seja zero. Os segredos da bobinagem são fazer com que a força magnetomotriz não chegue a valores altos.[2]

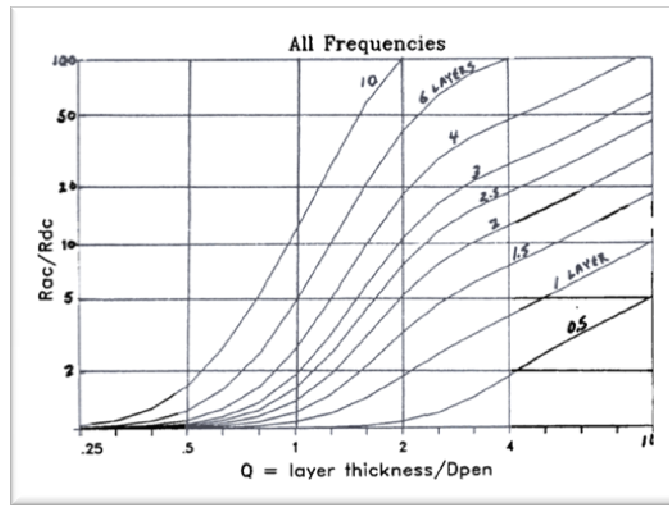


Figura 70: Resistência Equivalente para um Enrolamento com Várias Camadas

Como conclusão sobre a parte de bobinagem, cuidados a ter e maximização de indutâncias, é de reter o seguinte:

- Em geral fios de maior secção e maciços levam a um baixo aproveitamento do cobre. Fios mais espessos em altas-frequências podem implicar mais perdas⁸⁰;
- O melhor condutor maciço para altas-frequências é a *strip-line*⁸¹;
- Sempre que se tem dois condutores com correntes contrárias, deve-se colocá-los com as faces de maiores dimensões um contra o outro;
- Fazer *interleaving*⁸² melhora a resistência AC equivalente muito significativamente;
- O paralelo de condutores só traz melhorias quando estes estão no mesmo número de camadas (ao lado uns dos outros);
- As perdas aumentam com o número de camadas (de espiras);
- Deve evitar-se camadas passivas no interior dos enrolamentos.

4.1.2.9 O Fio de Litz

O fio de Litz (ou *Litz wire*⁸³), é um tipo especial de fio condutor usado em electrónica. Este fio foi desenvolvido especialmente para reduzir as perdas por efeito pelicular e por efeito de proximidade em condutores eléctricos. Consiste num enrolamento (que pode adoptar diferentes configurações, como as figuras demonstram) de muitos fios muito finos, cobertos (ou esmaltados) individualmente com um material isolante e/ou não inflamável e entrelaçados ou enovelados juntos, segundo um padrão ordenado e descrito que envolve diferentes níveis de enrolamentos.[11]

⁸⁰ Sob efeitos de proximidade severos, por exemplo num enrolamento de muitas camadas, existem situações em que o uso de um condutor mais fino tem menos perdas.

⁸¹ Strip-line, inventada nos anos 50 por R. Barret, é uma linha de transmissão TEM (campo electromagnético transversal ao sentido de propagação) como o cabo coaxial.

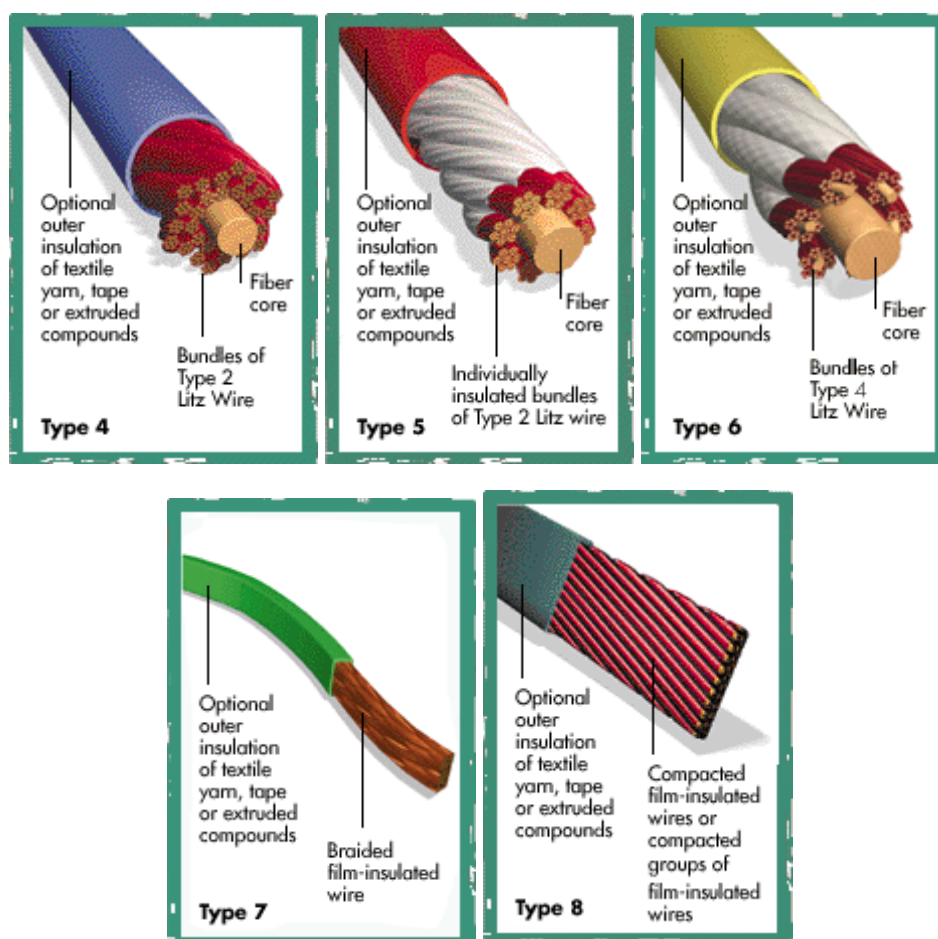
⁸² Em bobinagem, *interleaving* é bobinar camadas de primário e secundário alternadamente.

⁸³ O termo "Litz" vem de *Litzendraht*, que em alemão significa empacotados, embrulhados.

Figura 71: Tipos de Fio de Litz I



Figura 72: Tipos de Fio de Litz II



São estes condutores feitos de fios entrelaçados, com secção muito pequena (tipicamente $<0.1\text{mm}^2$), que individualmente ultrapassam o efeito pelicular e sofrem pouco dos efeitos das correntes induzidas.

Embora o fio de Litz esteja em paralelo do ponto de vista eléctrico, os fios andam em média em todas as partes da secção do condutor, não existindo por isso um fio que pertença a uma dada parte da secção do condutor. Deixa-se de ter faces. O *Litz wire* atenua muitos dos problemas falados. Repare-se que se não fossem entrelaçados, por estarem em paralelo, o efeito era o mesmo de termos um fio maciço (as correntes induzidas provocavam os mesmos efeitos).

Como epílogo sobre construção de transformadores e indutâncias, ficam estas noções práticas:

- Enrolamentos com fio de Litz principalmente nas zonas de máxima força magnetomotriz em valor absoluto;
- Enrolamentos a aumentarem progressivamente de secção quando temos menor força magnetomotriz em absoluto;
- Uso de condutores planos feitos com chapa de cobre nos enrolamentos de maior corrente;
- Fazer *interleaving*;
- O *interleaving* implica mais isolamento, o que aumenta as indutâncias de fugas, que por sua vez geram mais oscilações. O espaço ocupado pelo isolamento também aumenta o volume do transformador.

4.2 OPTIMIZAÇÃO NO PROJECTO DE UM SISTEMA

Uma optimização de um sistema genericamente consiste em variar parâmetros internos de modo a minimizar (ou a maximizar) uma função pesada das características a optimizar (como por exemplo tamanho, rendimento, custo de produção, etc.)

A eficiência eléctrica de uma entidade (de um componente, dispositivo ou sistema) em electrónica e electrotecnia é definida pelo rácio entre potência útil (na saída) e o total de potência eléctrica consumida:

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{total}}}$$

A alta eficiência é obviamente desejável quando se projecta sistemas que (por exemplo) são alimentados a baterias. A ineficiência tem um custo (pago à companhia de electricidade ou o custo associado à fonte de potência) a ser contraposto em relação ao custo de alcançar uma eficiência melhor (escolhendo componentes diferentes ou redesenhando o sistema por exemplo). Ainda, qualquer variação na potência de entrada ou de saída, produzirá provavelmente calor dentro do sistema em si (apesar de ruído e outras vibrações mecânicas envolverem, pelo menos teoricamente, ineficiências distintas), calor esse, que terá de ser removido ou dissipado do sistema, se este não se mantiver na sua gama de temperaturas de operação. Se o sistema se encontrar num ambiente de clima controlado (como um escritório, ou uma habitação), calor gerado poderá afectar o aquecimento, ventilação ou custos de ar condicionado.

Para maximizar o rendimento de um inversor (o que é o mesmo que minimizar as perdas), em relação às características do núcleo e bobinagem do transformador, frequência, transístores usados, etc. é preciso levar em linha de conta a conjugação desses parâmetros que dê o valor mínimo de perdas:

$$P_{\text{perdas}} = P_{\text{perdasCobre}} + P_{\text{perdasMagnéticas}} + P_{\text{perdasOutras}}$$

- As perdas no cobre aumentam com a frequência, com a corrente e com o comprimento dos condutores;

- As perdas no núcleo diminuem com o aumento do número de espiras e aumentam com a frequência;
- Num transformador (mantendo o número de espiras), as perdas podem diminuir até certo ponto com o aumento da frequência e depois aumentar (com o aumento da frequência o fluxo de magnetização é menor).

Num dispositivo inversor, uma característica importante é o rendimento em função da carga. No caso de um inversor para microgerador eólico com ligação à rede, o ideal seria ajustar essa curva de modo a maximizar o rendimento médio, por exemplo ao longo de um ano.

Infelizmente, o procedimento anterior é impraticável, pois não é (altamente) previsível a quantificação do vento que fará amanhã. No entanto com uso de estudos estatísticos padrão poder-se-ia ajustar os parâmetros de modo ter o máximo de rendimento médio e por isso a máxima potência extraída.

Uma vez que as variáveis são imensas o problema resolve-se por experimentação, usando-se o bom senso para analisar os resultados. Existirá uma potência para a qual o rendimento é máximo. É essa que os fabricantes põem nas especificações, pois é a que transmite uma imagem melhor do produto. Por vezes este tipo de métrica é traiçoeiro, já que um aparelho com um rendimento máximo menor pode em média ter mais rendimento.

Como é difícil especificar o problema com um conjunto de equações matemáticas e escolher a solução óptima, pode partir-se de uma solução inicial que pareça razoável e depois afinar por simulação e posteriormente com base em dados experimentais, ou seja, experimentar e decidir sobre um compromisso de eficiência para o sistema.

4.3 FILTRAGEM

Dada a inexistência de garantias quanto à regulação da tensão de entrada do inversor, há que investir numa boa filtragem: admitir uma pior situação no que respeita à tensão de entrada e à corrente retirada da fonte por parte do inversor. Nessa situação tem que se usar condensadores com capacidade o suficiente para que o *ripple* da tensão não exceda determinado valor predefinido.



Numa turbina eólica a pior situação é quando a frequência de rotação é mais baixa e quando se tenta retirar a máxima potência. Na realidade esta situação é pessimista, pois com pouco vento não se consegue retirar a máxima potência. É preciso desligar o sistema de actuação quando a tensão de entrada desce abaixo de um valor mínimo de limiar.

Para limitar a RFI e EMI (Interferência de radiofrequência e electromagnética) é de bom senso usar uma indutância em série. Deve-se usar também condensadores cerâmicos em paralelo com os electrolíticos, de modo a ter uma capacidade que responda bem a pedidos rápidos (altas frequências).

Uma das características dos condensadores é a máxima corrente de *ripple* admissível. Um condensador tem uma resistência série, pelo que existe um valor máximo de corrente RMS⁸⁴ que pode

⁸⁴ Do inglês, *Root Mean Square*, valor quadrática médio, ou valor eficaz e é a medida estatística da amplitude de uma grandeza variável no tempo e é dado pela fórmula: $x_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle}$. Em electrónica, associa-se a potência, corrente e tensão, que são grandezas variáveis no tempo (sinusoidalmente, regime AC) e em que o valor RMS é dado aproximadamente por:

$$[V]_{rms} \text{ ou } [I]_{rms} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}.$$

passar no condensador sem o aquecer demasiado. É necessário usar um condensador que suporte correntes de *ripple* elevadas sem comprometer o seu tempo médio de vida.[15]

A filtragem de entrada (com ilustrado) deve ser um compromisso dado pela seguinte equação:

$$\Delta V = \frac{I_{max} \times T_{max}}{C}$$

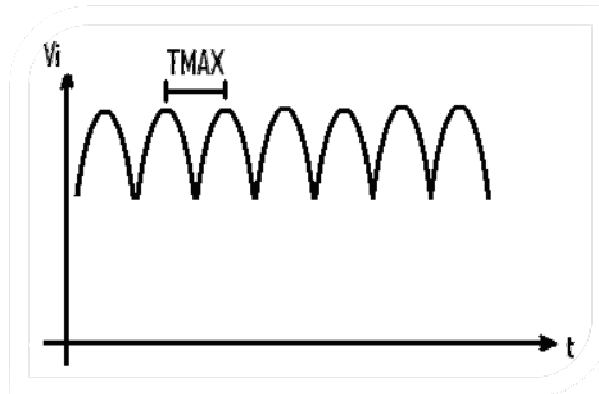


Figura 73: Filtragem da Tensão de Entrada

4.4 PROTECÇÕES E SEGURANÇA

Apresenta-se uma lista de normas gerais a seguir no projecto e implementação de sistemas electrónicos. Todas as normas a seguir descritas são escrupulosamente cumpridas neste trabalho.[22]

- Marcar e Rotular: o dispositivo tem de possuir as marcas e os rótulos com as gamas de entrada (tensão e corrente), tipo de potência (AC ou DC), a frequência de rede, a classe de isolamento, a carga classificada. Os rótulos devem aderir aos requisitos standard, inclusive a marcas de aviso aplicáveis;
- *Clearence*⁸⁵ e *creepage*⁸⁶: mínima distância entre condutores quer da rede de entrada, quer da linha isolada de saída. É 3 mm (quando a tensão de entrada não excede $V_{rms} = 250\text{ V}$) entre linhas de fase oposta. E 8 mm entre as linhas de entrada e a caixa ou as linhas de saída;
- Tensões inofensivas: tensões que não são consideradas perigosas se uma pessoa (em contacto com a terra) entrar em contacto com elas. Ou seja, condutores que não excedem 42,4 V e possuem uma capacidade-portadora de corrente de menos de 8 A de pico. Estas baixas-tensões de segurança⁸⁷, devem estar fisicamente separadas e isoladas de tensões não consideradas inofensivas;
- Acessibilidade do operador: o operador não pode inadvertidamente entrar em contacto com tensões não inofensivas na parte de fora do dispositivo. Contacto com tais tensões só pode ser acessível por meio de ferramentas adequadas. O operador deve aceitar conscientemente o risco de abrir o dispositivo com recurso a tal ferramenta. Alguns circuitos podem ainda assim, ter de possuir um mecanismo de corte de tais tensões perigosas mesmo depois de um acesso adequado ter sido feito;



⁸⁵ *Clearence* é a distância quando o único isolante entre condutores é o ar.

⁸⁶ *Creepage* é a distância na superfícies de um material isolante (e o condutor mais próximo não isolado).

⁸⁷ Em inglês, Safety Extra-Low Voltages, SELVs.

- Cablagem: todos os fios exteriores têm de possuir rácio de isolamento que satisfaz ou excede os requisitos para a tensão mais elevada que circula no condutor;
- Encapsulamento ou couraça: o encapsulamento, como primeiro nível de protecção deve ser construído de um material isolante ou ser aterrado se metálico. Superfícies metálicas e controlos devem estar igualmente aterrados. A máxima resistência em série de qualquer superfície metálica exposta e a terra, não pode exceder $0,1\Omega$, quando atravessada por uma corrente de 25A;
- Resistência ao fogo: Materiais usados no produto ou na distribuição deste, não podem ter comportamento combustível para uma chama;
- Resistência de isolamento e força dieléctrica: série de testes padrão usados para determinar a capacidade do produto desenvolver comportamentos anormais quando submetido a picos de tensão ou relâmpagos.

	Duração	Frequência (ou taxa de cresc.)	Amortecimento com a distância
Descargas Atmosféricas	Muito curta (μ s)	Muito alta (até 1000 kV/ μ s)	Forte
Descargas Electrostáticas	Muito curta (ns)	Alta (≈ 10 MHz)	Muito forte
Comutação	Curta (ms)	Média (1 a 200 kHz)	Médio
Sobretensões temporárias à frequência do sistema	Longa (s), ou muito longa (horas)	Frequência do sistema (50 Hz)	Não existe

Figura 74: Características Típicas de Sobre-tensões nas Redes Eléctricas [Séraudie, 1999]

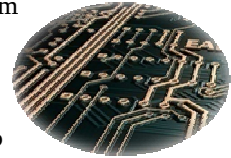
Há que ter ainda em consideração as normas de emissão de interferência electromagnética e interferência e de radiofrequência. Para atenuar estes problemas devemos usar *snubbers* e planos de massa onde hajam geração de *spikes* e oscilações transitórias problemáticas e filtragens à entrada e à saída. Encapsular numa caixa metálica ligada ao filtro de saída é uma medida imprescindível.



4.4.1 Planos de Massa

Os planos de massa são questões de grande importância na altura do desenho das placas de circuito impresso. Eles não são completamente imunes a *spikes* induzidos por indutâncias das pistas com sinais de alta-frequência, mas têm menos indutância que as pistas e por isso um melhor comportamento.

Regra geral devem fazer-se pistas o mais curtas possível e usar planos de massa. Um plano de massa para o primário, outro para o secundário e outro para o controlo são à partida necessários. Sempre que temos circuitos muito sensíveis a pequenas variações de tensão devemos ter um plano nessa zona.



Nas alimentações, uma colocação apropriada dos condensadores é a chave para concentrar o ruído nas zonas onde é gerado. Em geral uma zona problemática deve ter um melhor caminho para a ligação exterior da massa pelo plano que lhe é destinado, ou seja, essa massa deve dar um caminho mais próximo para a ligação exterior do que a massa do que os restantes.[22]

4.4.2 Protecções de Picos e Snubbers⁸⁸

Quando um sistema com capacidades e indutâncias é submetido a uma comutação a alta-frequência geram-se oscilações nos instantes posteriores ao instante de comutação. Essas oscilações são problemáticas tanto ao nível de interferências electromagnéticas como ao nível dos circuitos a eles ligados.

Tensões de pico grandes podem estragar os *switches*. Para suavizar essas oscilações põem-se normalmente circuitos RC em paralelo com os *switches*. Esses circuitos são geralmente chamados de snubbers⁷⁶, pois amortecem essas oscilações através da dissipação de energia. Como medida de protecção deve usar-se díodos zener⁸⁹ de modo a garantir que as tensões de pico não excedem o valor máximo admissível.

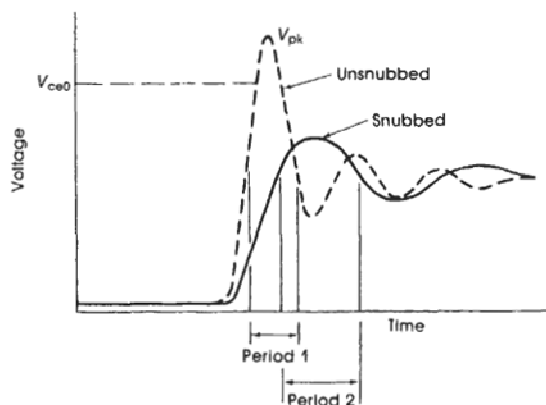


Figura 75: Suavização de Oscilações com Recurso a *Snubber*

⁸⁸ *Snubber*, atenuador, amortecedor, minorador (tradução livre)

⁸⁹ Os díodos zener devem ser usados como medida de protecção e não a contar com o seu funcionamento permanente.

Os *snubbers* devem ser usados sempre que é necessário. De qualquer modo evitar oscilações tendo cuidados de *layout* é sempre boa prática. O *snubber* dissipa energia e por isso pode baixar o rendimento. Os díodos zener devem ser usados como protecção dos circuitos electrónicos.

Uma vez que é difícil modelar as capacidades e indutâncias de um circuito, apresenta-se de seguida um procedimento prático para afinar um *snubber*:

- Com recurso a um osciloscópio, medir (no elemento a que se vai aplicar a protecção com *snubber*) a tensão de pico e a frequência de oscilação, F_0 da forma de onda com o *spike* (pico abrupto);
- Colocar em paralelo um pequeno condensador aos terminais do elemento. Aumentar o valor do dito condensador por iterações sucessivas até que a frequência de oscilação seja reduzida para metade do seu valor antes da colocação de qualquer protecção. Neste ponto, o valor das capacidades parasitas, C_0 é um terço do valor do condensador em paralelo;
- Calcular o valor óptimo estimado da resistência do *snubber*:

$$R = \frac{F_0 \times C_0}{6,28}$$

- Colocar esta resistência em série com o condensador adicionado anteriormente. Atenção ao valor desta resistência que poderá ter de ser alterado (para maior ou menor) de maneira a manter controlado o efeito de *damping* da tensão no elemento.
- A potência total dissipada no *snubber* é dada por:

$$P_s = C \times F \times V_{pp}^2$$

Onde, C é o valor do condensador do *snubber*, F a frequência de trabalho e V_{pp} a tensão aos terminais de C .

5

PROJECTO DE HARDWARE DE CONTROLO

Para actuar no módulo de potência do inversor é necessário um sistema de geração de sinais (PWM, controlo, sinalização, etc.) e um sistema de actuação, isto é, sistema de controlo. Para isso, implementar-se-á um módulo não sujeito ao módulo de potência (e ao módulo de microcontroladores), como circuito independente em placa própria.

5.1 ACTUAÇÃO E CONTROLO NO MÓDULO DE POTÊNCIA

Como descrito no capítulo três, a sugestão para potência, sofrerá modulação no enrolamento primário, sendo preciso comutar os transístores com um sinal posto em cada uma das suas *gates*. Será também no módulo de controlo que o transformador de Flyback (gerador de tensões variadas com funcionalidades distintas e com função de transformador de isolamento galvânico entre a electrónica de controlo e o módulo de potência) ficará alojado.

A próxima ilustração mostra os circuitos de geração de sinais para a topologia do inversor escolhida (modulação no primário). Na geração de sinais usa-se um sistema divisor da frequência de relógio por 2, muda de estado a cada período do *clock*. Esse sinal é depois usado para seleccionar qual o par de transístores da ponte do primário que estão activos. O resultado é uma actuação alternada no ataque ao transformador.

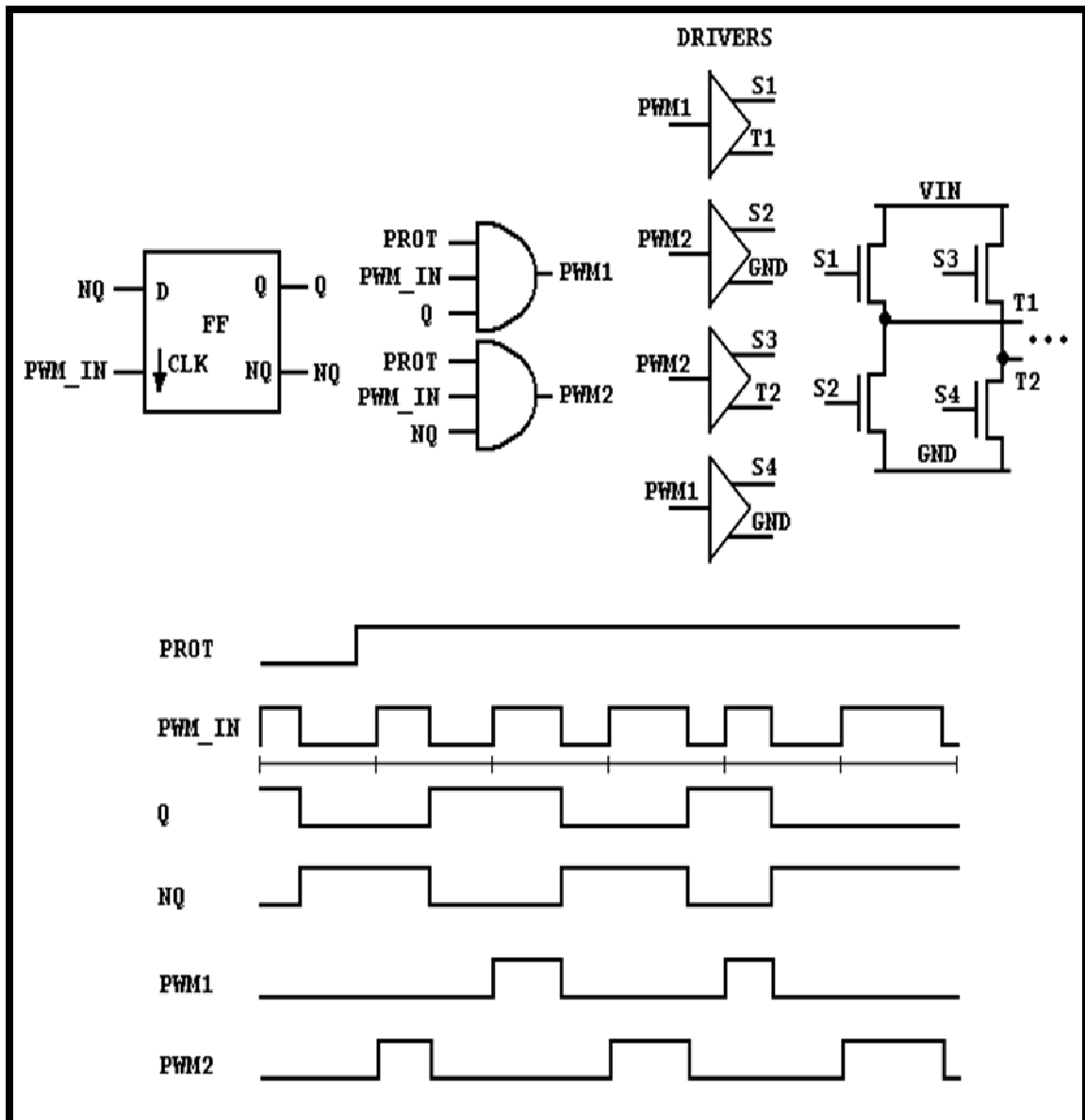


Figura 76: Sistema de Geração de Sinais para Actuação nos Transístores de Comutação (no Primário)

Há um cuidado importante a não descurar, mormente, não se pode deixar o *duty-cycle* do PWM chegar próximo de 100%. Uma margem de segurança é sempre necessária para não dar hipótese (devido a atrasos de comutação dos *drivers* e transístores) de se fazer um curto-circuito na ponte de transístores.

A mudança de actuação do par de transístores dá-se na transição descendente do *clock* para evitar uma potencial ligação dos dois ramos por um pequeno espaço de tempo. Nesta arquitectura 100% de largura de pulso não é permitido. O sinal “PROT”, quando a zero, desactiva todos os transístores da ponte. A sua explicação encontra-se a seguir, no próximo diagrama temporal.

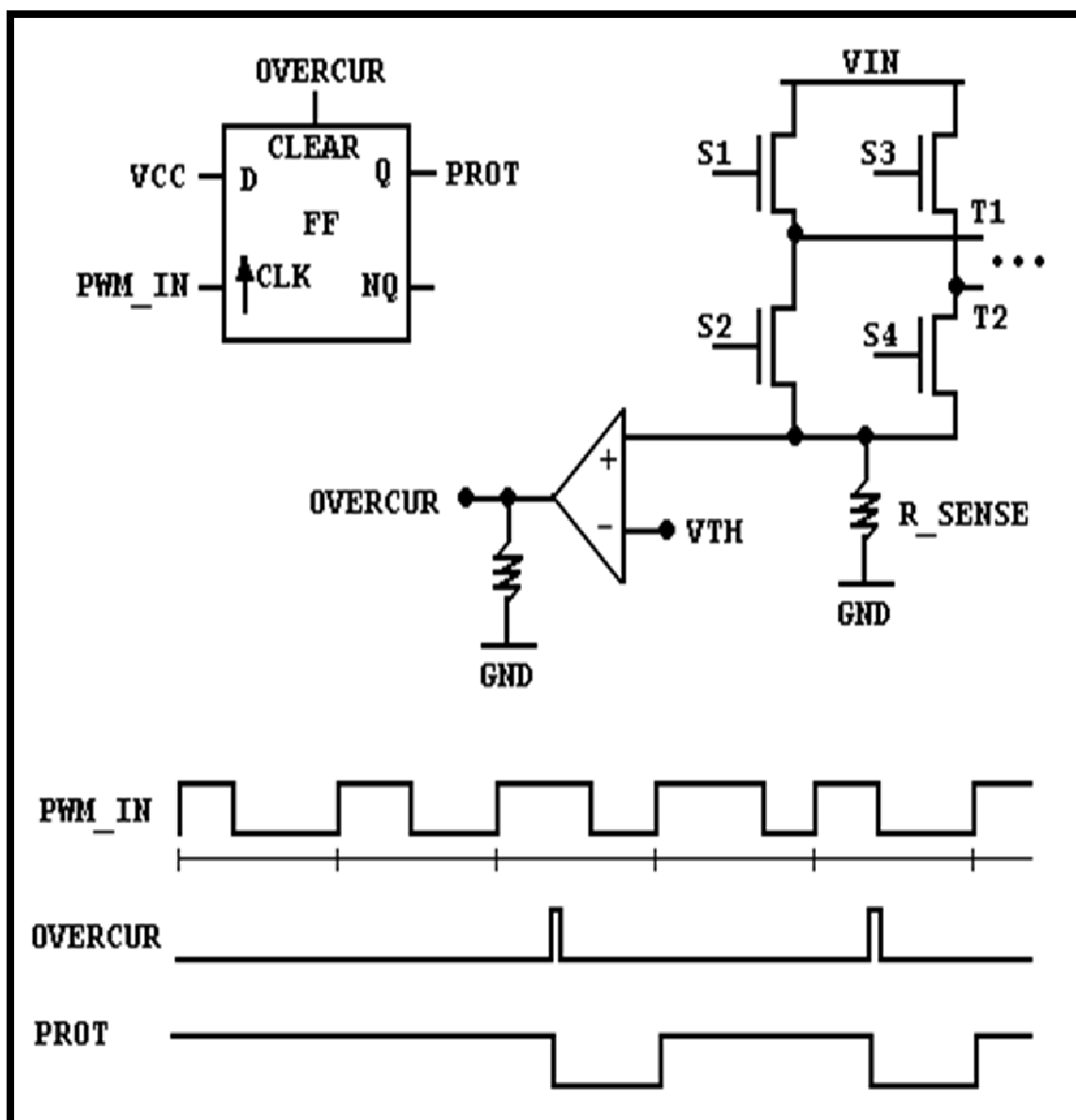


Figura 77: Protecção por Hardware

Para aumentar a fiabilidade, possuir protecções para aumentos rápidos de corrente (picos), é uma necessidade incontornável. Uma protecção de corrente por *hardware* no primário é mais geral que uma protecção no secundário e mais eficaz que uma protecção por *software*.

Quando a corrente excede um valor limite, um comparador rápido sinaliza. Um *flip-flop*⁹⁰ (memória da protecção) vai a zero (protecção activada) e as saídas de PWM são desactivadas. A memória da protecção é reiniciada no próximo ciclo de actuação. A protecção actua assim ciclo a ciclo.

⁹⁰ Em electrónica e circuitos digitais, o *flip-flop* ou multivibrador biestável é um circuito digital pulsado capaz de servir como uma memória de um bit.

É importante referir que aqui o *flip-flop*⁹¹ é *positive edge triggered*⁹¹. Repare-se que se o disparo fosse na transição descendente, um pico de corrente próximo da descida do PWM ligaria a protecção, mas o rearme poderia não ser possível.

Fusíveis e varistores de potência são bem-vindos para usar em protecções mais lentas. É conveniente colocar um varistor na saída para protecção contra cargas indutivas.

5.2 ACTUAÇÃO E CONTROLO DA MODULAÇÃO

As malhas de controlo podem ser analógicas ou digitais. As segundas são mais flexíveis pois podem ser reprogramadas quando se usa um microcontrolador.

Para inversores *stand alone*, uma malha de controlo analógica e um circuito de protecção pode ser suficiente. No entanto para um inversor de ligação a rede as funcionalidades começam a ser muitas e é necessária mais flexibilidade. Nessas situações faz sentido explorar um microcontrolador. No âmbito deste trabalho, o inversor desenvolvido é *grid connected* e por isso foi proveitoso e imprescindível efectuar a actuação com base em microcontroladores.

Nos moldes tecnológicos actuais já não é atractivo comercialmente um inversor *stand alone*. Ainda assim, fica uma sugestão de implementação.

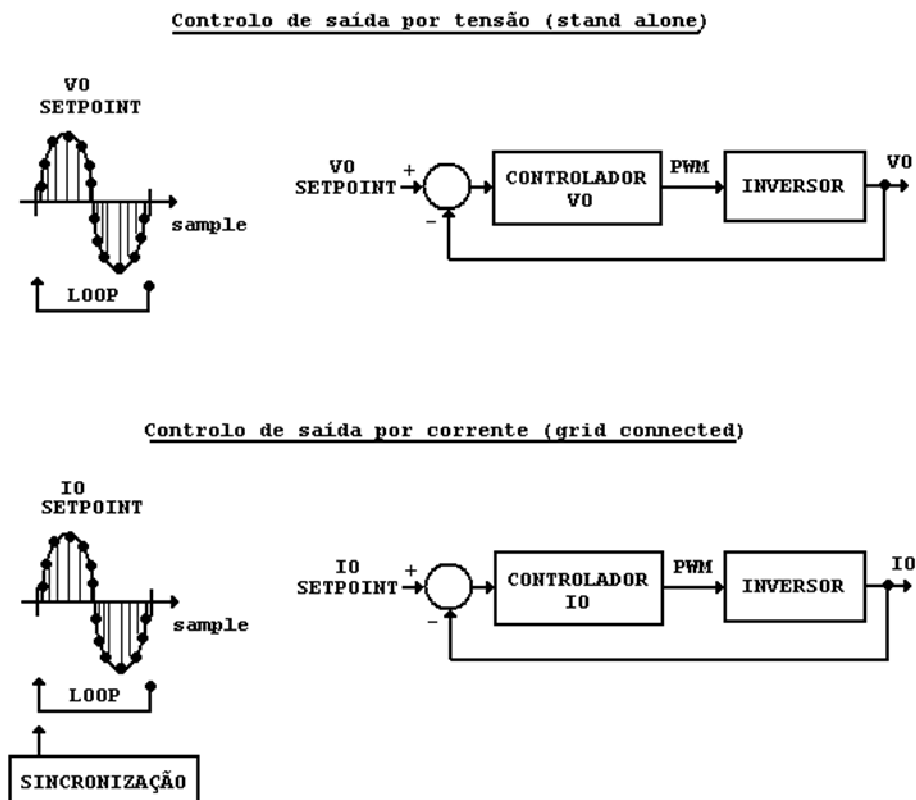


Figura 78: Controlo do Inversor (Modo Corrente/Modo Tensão)

⁹¹ Sensível a transições positivas, de '0' para '1'.

No modo *stand-alone*, o controlo é feito por tensão e deve garantir que a energia a frequências inferiores a 50 Hertz (DC principalmente) introduzidas, não ultrapasse determinados limites. Neste modo o comportamento do circuito LC depende bastante da corrente de saída. O sistema de controlo deve conseguir lidar com estas diferenças.

Para cargas baixas (R_{out} grande) é de esperar que a tensão de saída fique mais ruidosa. Não esquecer que a frequência de corte do filtro depende de R_{out} . Agravante ainda é o funcionamento em modo descontínuo para cargas baixas: como a corrente só entra no filtro, ter uma carga mínima é uma necessidade (para descarregar o condensador). Deve ser incluída uma carga resistiva, a dissipar menos de meio Watt só para não deixar o inversor completamente sem carga.

No modo *grid connected*, o controlo é feito por corrente. O *setpoint* deve ser sincronizado periodicamente com a tensão da rede.

5.3 ACTUAÇÃO E CONTROLO NA LIGAÇÃO À REDE

Nos dias de hoje, devido à concorrência e à regulação confusa, a rede eléctrica tende a estar separada nas seguintes entidades: geração, transmissão e distribuição. É comum a ligação de produtores distribuídos à rede e o uso alargado da electrónica de potência.

5.3.1 A Rede e a Qualidade da Energia Eléctrica

Devido a tudo isto, a qualidade da energia que consumimos tem vindo a descer. Qualidade em energia eléctrica significa estabilidade, distorção e falhas.

As interrupções de alimentação são consideradas previstas, quando o cliente é informado com antecedência e destinam-se a permitir a execução de trabalhos programados ou acidentais na rede, resultantes de fenómenos permanentes ou transitórios geralmente associados a acontecimentos externos, avarias ou interferências [RQS, 2003].

A classificação de interrupções quanto à duração também não é consensual. Numa única organização podem surgir diferentes classificações, consoante o grupo de trabalho em causa. A tabela abaixo, apresenta várias classificações de interrupções, consoante a duração, segundo várias normas. Em Portugal, a classificação deve ser efectuada de acordo com a norma NP EN 50160:2001, que é a norma de referência para este documento.[4]

Norma	Classificação	Duração
NP EN 50160:2001 e IEC 610	Interrupção breve	Igual ou inferior a 3 minutos
	Interrupção longa	Superior a 3 minutos
IEEE 1159-1995	Interrupção momentânea	Superior a 1/2 ciclo e inferior a 3 segundos
	Interrupção temporária	Superior a 3 segundos e inferior a 1 minuto
	Interrupção prolongada	Superior a 1 minuto
IEEE 1250-1995	Interrupção instantânea	Superior a 1/2 ciclo e inferior a 500 milissegundos
	Interrupção momentânea	Superior a 500 milissegundos e inferior a 2 segundos
	Interrupção temporária	Superior a 2 segundos e inferior a 2 minutos
	Interrupção prolongada	Superior a 2 minutos

Tabela 7: Classificação de Interrupções (quanto à Duração) na Distribuição de Energia [EDP, 2006]

É um conceito para o qual não é muito fácil apresentar uma definição clara e objectiva. Contudo, parece existir um consenso generalizado de que “a qualidade é a adequação de determinado bem ou serviço à sua finalidade ou uso”. No domínio eléctrico, pode considerar-se que a energia fornecida por um sistema eléctrico tem qualidade quando garante o funcionamento do equipamento eléctrico, sem que se verifiquem alterações de desempenho significativas.

Numa perspectiva de distribuição de energia, QEE⁹² está geralmente associada à qualidade e à continuidade da onda de tensão. Em condições normais de exploração, a tensão fornecida ao cliente é controlada pelos sistemas de distribuição, sendo a corrente absorvida dependente da carga das instalações.

Neste contexto, a QEE pode ser abordada a duas dimensões, a saber:

- continuidade de tensão, caracterizada pela frequência e duração das interrupções de fornecimento de energia eléctrica;
- qualidade da onda de tensão, caracterizada pela forma da onda de tensão, amplitude, frequência e simetria do sistema trifásico de tensões.

O sistema trifásico de tensões disponibilizado ao cliente é caracterizado por três tensões sinusoidais, com amplitude e frequência (50 Hz em Portugal) constantes e desfasadas 120°, no tempo. Desvios significativos a estas características de tensão conduzem inevitavelmente à degradação da QEE.

Deve tomar-se medidas para não deixar que no futuro a qualidade da energia desça. A nível global, existem varias soluções que se baseiam tanto em distribuição DC como AC. É obvio que os gastos num lado seriam mais vocacionados para a remodelação das estruturas de distribuição e transmissão, e no outro para a electrónica, o de mais especial interesse. Repare-se que controlo do fluxo de potência em DC é sempre mais fácil.

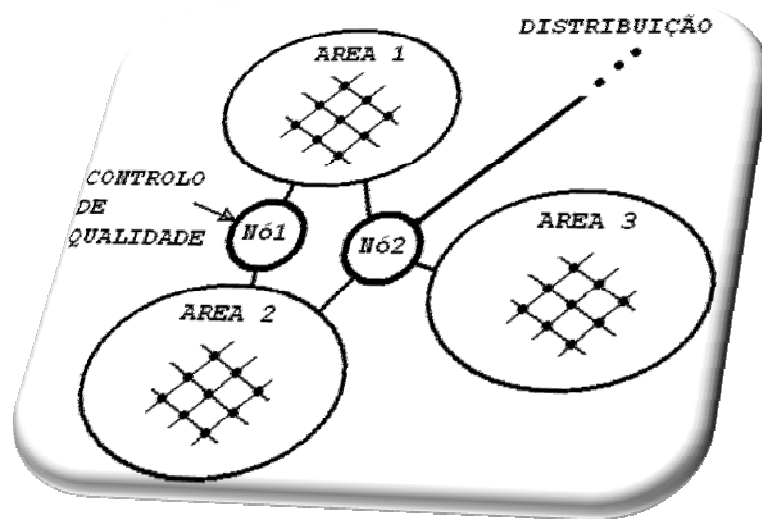
No caso de mudança dos sistemas para DC, por questões de compatibilidade poderíamos gerar um *bus*⁹³ AC na proximidade do utilizador, só para as cargas antigas. Existe a necessidade de hierarquizar o sistema de modo a gerir o fluxo e a qualidade da energia.

Deverá ser uma arquitectura genérica que se comporte bem como um sistema distribuído. Os problemas de *composability*, *scalability*, *dependability* terão grande importância aquando da especificação.

⁹² Qualidade da Energia Eléctrica, *Power Quality*, foi usado pela primeira vez, enquanto publicação, em 1968 [Bollen, 2000]. Nessa publicação foi apresentado um estudo, elaborado pela marinha dos Estados Unidos da América (EUA), em que foram analisadas as especificações de equipamento electrónico relativas à capacidade de funcionamento sob o efeito de perturbações de alimentação.

⁹³ Barramento.

Figura 79: Ideias sobre o Futuro da Rede Eléctrica



5.3.2 A Ligação de Produtores Distribuídos à Rede

Para já, os problemas de fornecer energia à rede estão relacionados com o facto de esta ser centralizada: não cumpre regras de sincronização com os sistemas distribuídos.

Quando a rede vai a baixo, normalmente volta com uma fase desconhecida. Se existir uma ilha de inversores (alimentados por quaisquer fontes de microgeração) com muita “força” estes podem segurar a tensão na rede (fenómeno conhecido como *islanding*) e embora seja uma hipótese algo remota, é possível trazendo problemas de ligação à rede centralizada.

A solução para estes problemas é não deixar que o *islanding* aconteça ou se acontecer que os inversores se apercebam da chegada da rede e que o choque que tal provoque seja fraco. Aqui o choque refere-se as correntes geradas na altura da ligação.

5.3.2.1 O Fenómeno de Islanding

Islanding, é a condição de um (ou mais) gerador de geração distribuída (ou microgeração) continuar a alimentar uma secção (ou área menor), apesar da potência da empresa distribuidora não estar presente.⁹⁴ Este fenómeno pode ser deveras perigoso para trabalhadores da companhia de electricidade que podem não se aperceber que ainda há potência no edifício apesar de não haver potência na rede. É

⁹⁴ Por exemplo, se num edifício equipado com painéis solares *grid-connected* houver um corte de energia e os ditos painéis continuarem em funcionamento, alimentando o edifício, este torna-se uma “ilha” de potência, rodeado por um “mar” de edifícios sem energia eléctrica.

por esta razão que os microgeradores distribuídos devem detectar fenómenos de *islanding* e imediatamente ser capazes de cessar a produção de energia.

Análogamente, o fenómeno conhecido como *intentional islanding*⁹⁵, é quando o utilizador desconecta o edifício da rede eléctrica e força o gerador distribuído a alimenta-lo.

Detectar a ausência de potência por parte da empresa distribuidora é complicado por duas razões fundamentais:

- O microgerador é em si mesmo uma fonte de potência, cuja tensão é por definição idêntica à tensão de rede, sendo portanto difícil distinguir as duas.
- O motor, rotor, aerogerador ou o que se aplique, pode continuar a rodar actuando como um gerador, criando a frequência similar à frequência original de rede. Isto pode verificar-se também se em conjunto, a carga no edifício formar um circuito ressonante à frequência de rede.

No entanto, o *islanding* pode ser detectado activamente ou por notificação da empresa distribuidora:

- uma maneira passiva, é fazer com que seja detectável que a voltagem da rede e a frequência já não estão dentro de certas gamas limite: quando já não é a linha que está a estabelecer o limite de tensão, essa tensão irá variar (normalmente decrescendo, mas não necessariamente). Ou então, mesmo que seja o motor a impor a frequência na linha, ele terá tendência a abrandar, baixando também a frequência *standard* da rede.
- a detecção activa é feita adicionando propositadamente uma perturbação à linha e analisando o seu efeito: como a rede oferece teoricamente uma impedância de zero Ohm, na ausência de potência na rede, a impedância que é vista, é a carga do edifício que é substancialmente mais alta.
- se a detecção ficar a cargo da empresa de distribuição, esta sabe quando retira a potência ao edifício e notifica o inversor para parar de produzir energia.

No entanto, há nas comunidade académicas desacordos quando ao perigo significativo dos fenómenos de *islanding*. Um estudo holandês⁹⁶ (este estudo apenas se aplica a painéis fotovoltaicos com inversor *grid-connected*) sugere que esperar 60 segundos após desligar uma secção de rede da central eléctrica, deve ser um período suficiente para que as flutuações estatísticas da potência e da carga na secção em *islanding* causarem desligar dos painéis fotovoltaicos, o que fará com que o *islanding* termine.

Então se o *islanding* não for permitido:

- os aparelhos identificam-se com um sinal extra.
- outra possibilidade é perturbar a frequência ligeiramente e medi-la.

Usando um sistema de relés que desliguem o inversor da rede e o liguem a um circuito de *backup* da casa, pode usar-se o inversor.

⁹⁵ *Islanding* intencional.

⁹⁶ http://www.iea-pvps.org/products/download/rep5_07.pdf

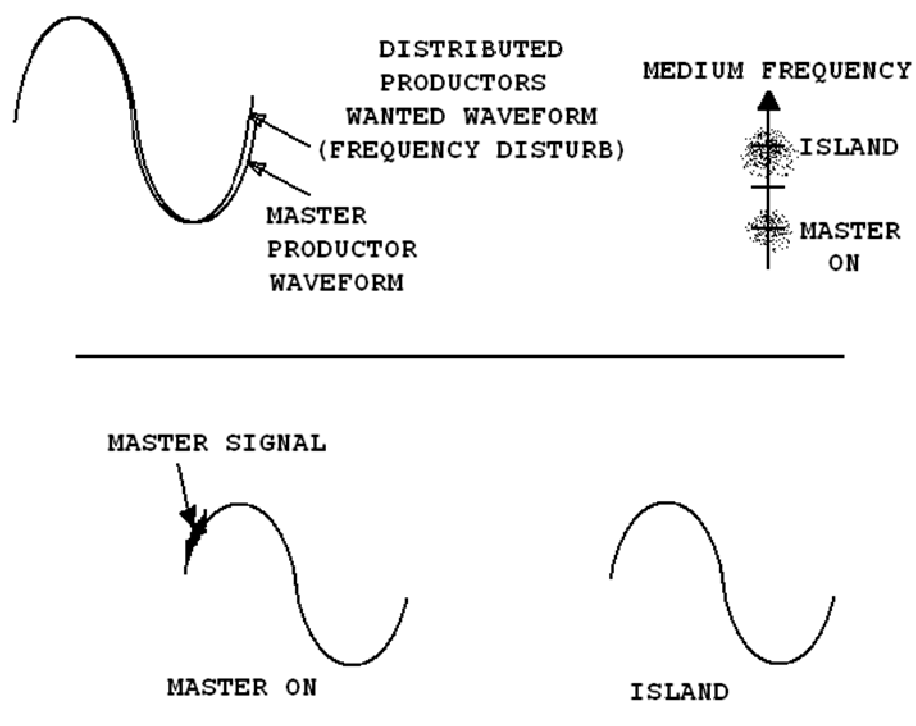
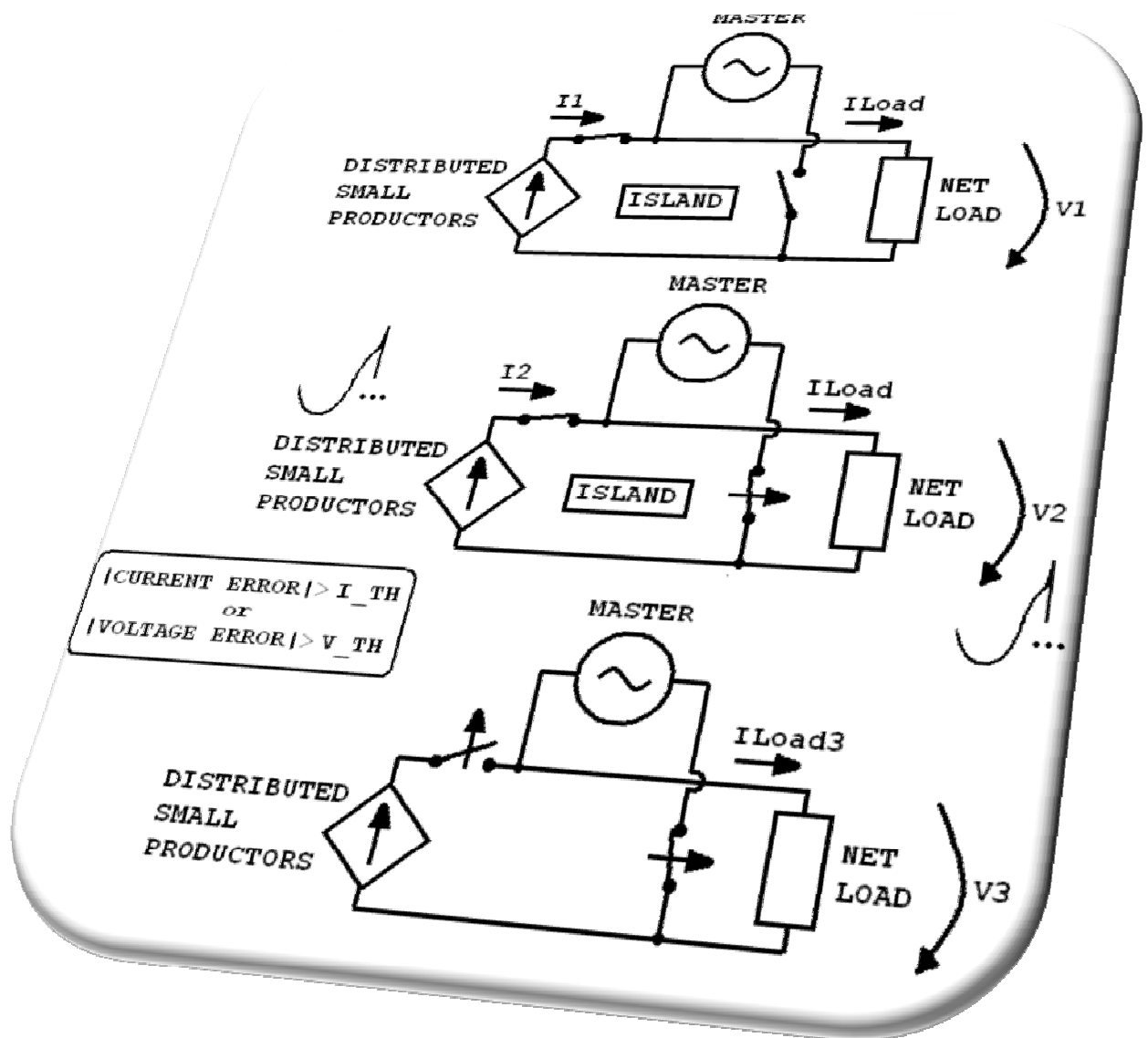


Figura 80: Mecanismos *anti-islanding*

Todavia, se o *islanding* for permitido, pára de actuar-se sempre que o erro na corrente exceder um dado valor ou a tensão sair fora dos limites da rede (erro de controlo). Visto de outro modo pode dizer-se que o inversor não admite mudanças de contexto rápidas. Quando o produtor *master* chega à rede, os inversores que estão em *islanding* desligam-se, porque haverá em princípio um erro de controlo. Admitir uma chegada da rede com uma diferença de fase arbitrária é possível porque os dispositivos possuem um filtro de saída que não deixa a corrente variar abruptamente. É mais fácil perceber o mecanismo ilustradamente:


 Figura 81: Mecanismos para Lidar com o *Islanding*

5.3.2.2 Colocação de Energia na Rede

A colocação de energia na rede é muito simples se a energia que se insere for bastante inferior à requerida pela carga que a rede sustenta: basta enviar uma corrente em forma de sinusóide. O efeito é retirar carga resistiva da rede.

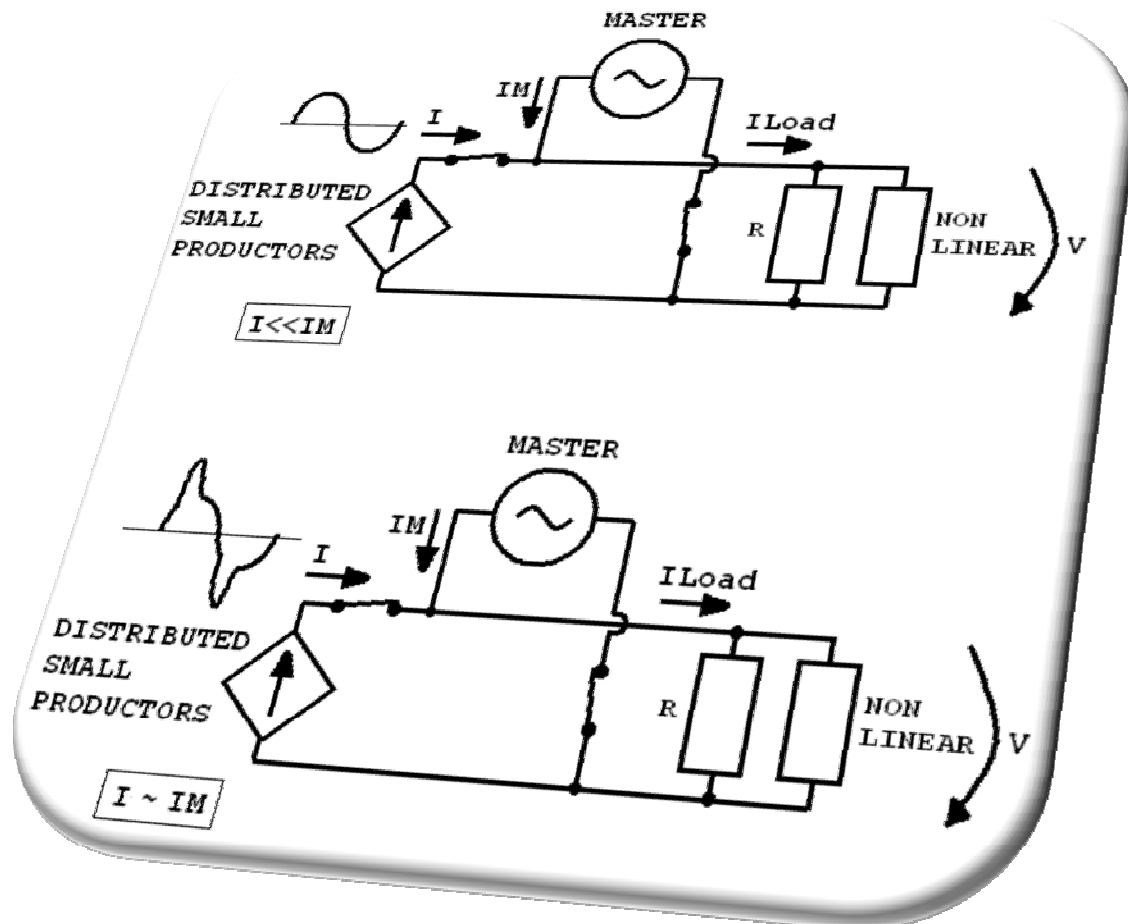


Figura 82: A Inserção de Energia na Rede Eléctrica (Situação Genérica)

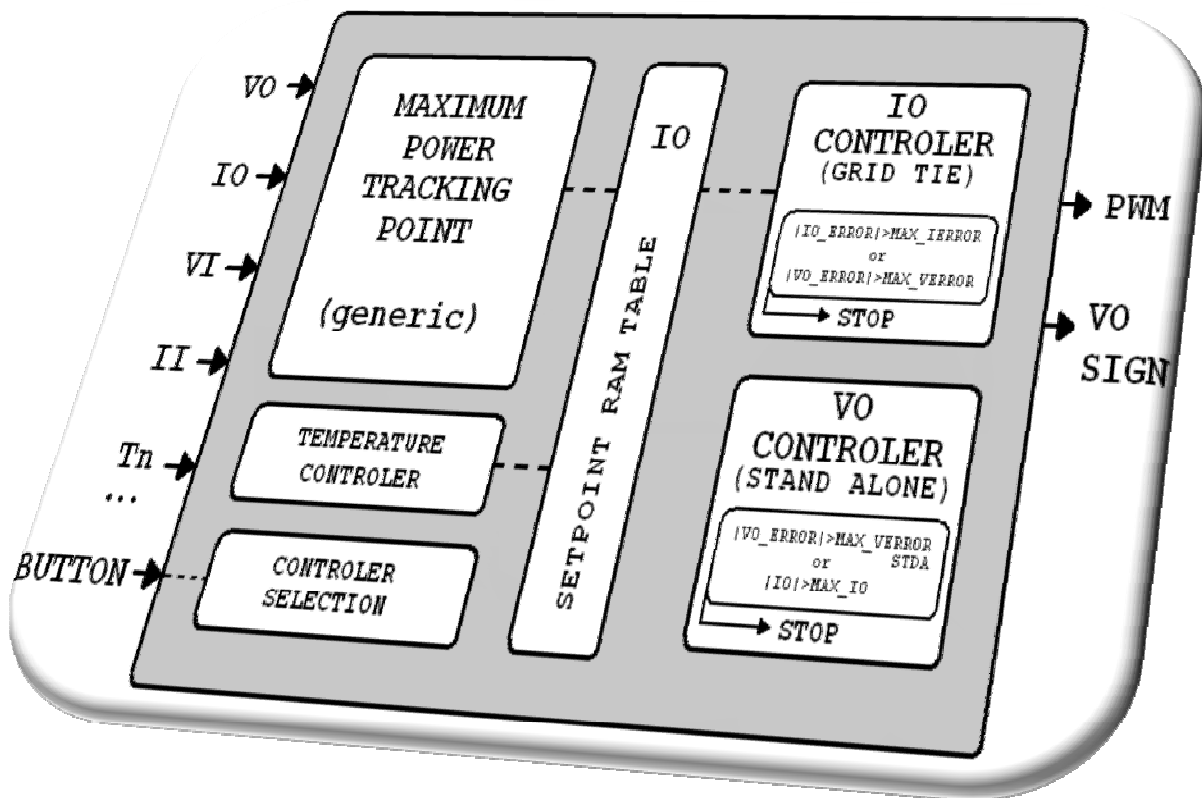
Se se começar a introduzir na linha uma potência tão forte como a rede (ainda que temporariamente) os problemas surgem. É necessário um sistema de controlo misto, que controle a tensão e a corrente simultaneamente. Quer isto dizer que a corrente deve ser ajustada de modo a compensar as variações da tensão da rede em relação à tensão padrão. Tem que se ter em consideração a qualidade da energia inserida, nomeadamente quanto à distorção e ruído produzidos por situações transitórias⁹⁷.

⁹⁷ Claro que esta situação é hipotética e não acontece a médio prazo com a produção doméstica actual.

5.4 ACTUAÇÃO E CONTROLO DO INVERSOR

As variáveis de controlo do inversor são a tensão e corrente de saída. A segunda deve ser ajustada em função da potência disponível pela fonte de energia, das necessidades da rede e dos limites do dispositivo. De seguida apresentam-se os diagramas de blocos das possíveis implementações do controlo do inversor por software⁹⁸. [15]

Figura 83: Sugestão de Controlo do Inversor I

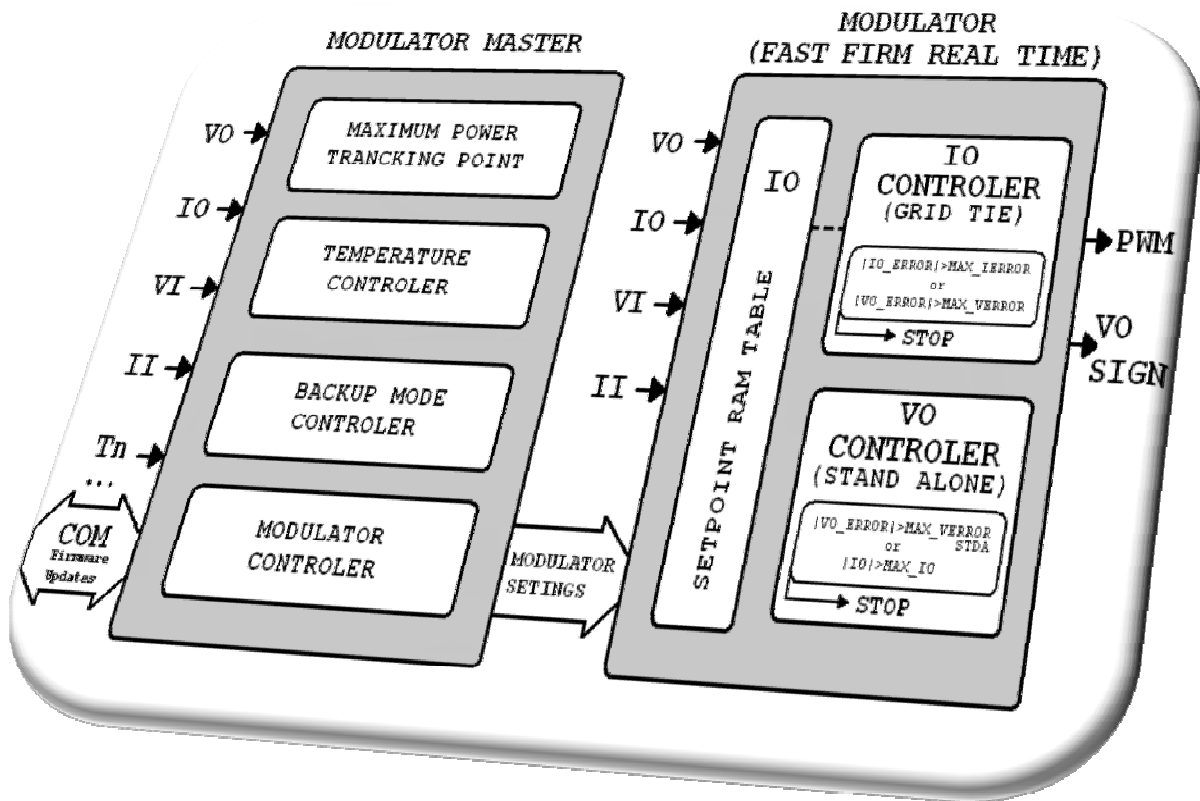


Nesta primeira sugestão, é de salientar três funcionalidades:

- Configuração manual do tipo de controlo;
- Ajuste de fluxo de potência com algoritmo simples;
- Paragem em caso de erro de controlo.

⁹⁸ Apesar do modo stand alone, ter sido descontinuado, apresenta-se ainda nestas duas sugestões uma solução de implementação do referido modo.

Figura 84: Sugestão de Controlo do Inversor II



Nesta sugestão, por sua vez, é de referir:

- Duas entidades de processamento;
- Um controlador controla e outro ajusta os parâmetros e modo de controlo.

Em princípio qualquer uma das soluções não traz problemas graves em relação à rede. Em qualquer situação não se admite choques de ligação grandes.

A primeira solução admite *islanding* e tem um algoritmo de controlo de potência retirada da fonte simples, devido ao facto de usar apenas um microcontrolador. A configuração de modo de ligação é manual (por exemplo com um botão). A corrente inserida tem uma pequena perturbação na frequência de modo a permitir o funcionamento das arquitecturas que usam essa informação.

A solução adoptada final é desenvolvida a partir da segunda opção que já tem duas entidades, uma altamente especializada no controlo do circuito de potência do inversor e outra especializada em controlos de alto nível, que dá ordens à primeira. Nesta solução a corrente é ajustada de modo a compensar deformações na tensão da rede. No controlo usa-se também uma frequência ligeiramente diferente para a modulação, de modo a permitir a detecção de *islanding*.

Detecta-se o *islanding* através da observação da frequência. Se a rede for a baixo e não se cair numa situação de *islanding* (é o mais provável), pode permitir-se um sistema com relés a ligar um circuito

de *backup* da nossa casa e passar para o modo *stand-alone*. Como é adequado em implementação com dois microcontroladores, pode ter mais funcionalidades, nomeadamente ligação em paralelo de mais inversores, *firmware, updates*, algoritmos de procura de ponto de potência máxima mais sofisticados. A interface com o utilizador pode ser mais completa.

A segunda opção é por conseguinte mais generalizável. A qualidade da energia inserida é ainda potencialmente melhor.

Passa-se então seguidamente à proposta implementada do Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia Eólica: constituída por três placas principais a que se chama módulos:

- Módulo de Potência: onde está a electrónica de potência, os transístores de comutação, o transformador de potência a entrada do gerador e a saída para rede.
- Módulo de Interface e Alimentações: é nesta placa que está o transformador de isolamento galvânico (que isola electricamente a electrónica de todo o sistema da parte de electrónica de alta-tensão) e de Flyback que gera a gama de alimentações necessárias à electrónica e ao controlo do sistema. Este é o módulo de ligação entre os outros dois.
- Módulo de Controlo: é a placa onde os dois microcontroladores estão acoplados.



MÓDULO DE POTÊNCIA

A descrição seguinte está já adequada à 2ª versão física do inversor. Algumas coisas estão diferentes ou não foram implementadas na versão de testes, por questões de ordem prática. No entanto a nível conceptual as versões são semelhantes.

O *layout*⁹⁹, circuitos e *software* da versão testada encontram-se em anexo e anexo electrónico. Na altura do encapsulamento e afinação da próxima (terceira) versão deverá ser efectuada a especificação e o plano de produção de 1000 unidades¹⁰⁰.

⁹⁹ *Layout*, é a representação de circuito integrado em termos planares de formas geométricas que correspondem aos padrões de camadas de metal, óxido ou semicondutor que constituem os componentes do circuito integrado.

¹⁰⁰ Mais adiante haverá uma secção propositadamente para trabalho e sugestões futuras.

6.1 CONCEITUALMENTE

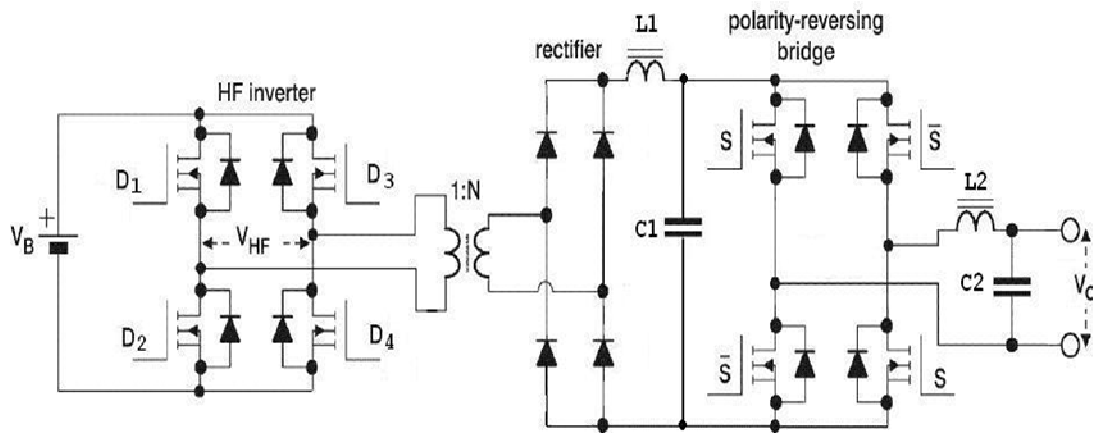


Figura 85: Sistema Proposto (Circuito do Módulo de Potência Simplificado)

Este é o esquemático do circuito implementado. Em mais pormenor, nomeadamente em diagramas e esquemas feitos em OrCAD encontram-se em anexo.

O próximo esquemático de blocos dos três módulos conjuntamente e uma boa explicação das funções são uma preciosa ajuda para se perceber o que realmente se implementou.

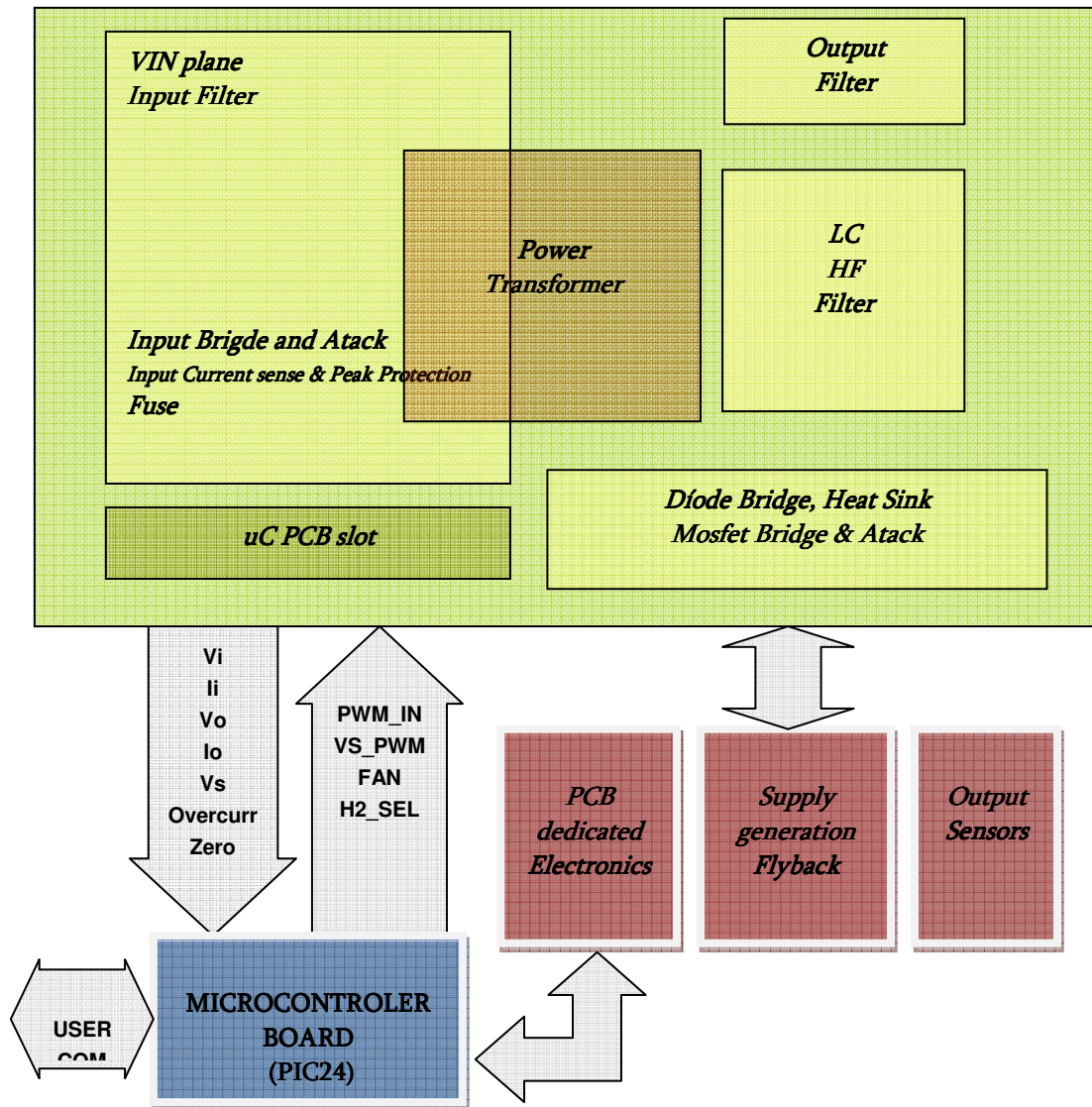


Figura 86: Diagrama de Alto Nível do Hardware

A placa de circuito impresso a azul corresponde ao circuito de *interface* do inversor, com sensores, gerações de alimentação para a electrónica e ataques dos transístores e algum acondicionamento dos sensores.

A grande placa (a verde) é a de potência: com uma enorme indutância e o transformador de potência no centro, protecções analógicas (fusível, *snubber*, etc), obviamente a ponte rectificadora e a ponte de comutação, como explicado no circuito simplificado anterior.

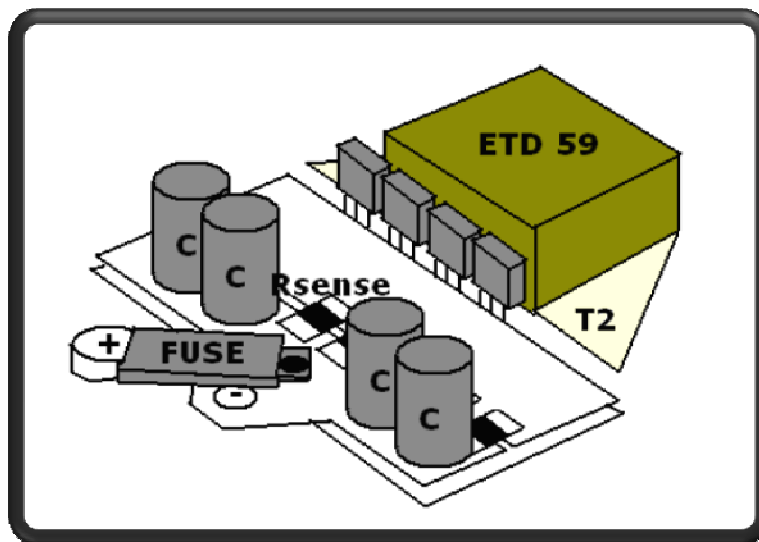
A placa dos microcontroladores (a vermelho) e da interface com o exterior liga à anterior através de um *slot*. Em princípio esta placa será mais dada a *upgrades* do que a primeira.

A alta tensão e a baixa tensão são separadas com uma distância de segurança no *layout* da PCB. A dissipação do primário é feita pela caixa¹⁰¹ com ventoinha. No secundário os díodos e transístores dispõem de um dissipador próprio por questões de segurança eléctrica.

¹⁰¹ Para efeitos de demonstração todo o sistema é montado em acrílico.

Quanto ao transformador, o secundário é bobinado no interior com fio de Litz e cablagem mais fina apropriada e o primário por cima com fita de cobre. A relação de transformação e demais especificações serão dadas mais adiante, com o primário a ter 5 espiras. O núcleo é um ETD59. O transformador de potência é uma inovação e será explicado mais à frente.

Figura 87: Primário PCB¹⁰²



A indutância de alta-frequência tem um núcleo ETD49 com *gap*. Para C1 podem-se usar vários condensadores de 1 μ F em paralelo. Para o filtro de saída o condensador deve ser menor.

Os circuitos integrados são preferencialmente com encapsulamento do tipo *surface mounted* para poupar espaço e por facilidade de fabrico em série. O Flyback das alimentações isoladas possui boa filtragem, um plano de massa bom e um *snubber* para atenuar o ruído da comutação.

Na zona de ataque ao transformador, as alimentações estão ligadas em dois planos, uma em cada face da PCB. Esta solução-esquema é melhor que montar uma alimentação ao lado da outra quando se trabalha com altas-frequências. Os transístores ficam entre o transformador e os planos de alimentação. As ligações para o secundário saem por fora com dois fios bem isolados (não estão nos pinos do suporte do transformador).

Os sensores de tensão e corrente do primário são feitos à base de resistências. Na saída usa-se um sensor de corrente baseado no efeito de *hall*¹⁰³ e um sensor de tensão baseado num opto-amplificador. No caso do sensor de tensão, recorre-se à alimentação do *optodriver* da ponte de selecção de arcadas correspondente para alimentar o opto-amplificador.

¹⁰² Os transístores estão representados por cima por comodidade, mas na realidade estão montados por baixo e aparafusados na caixa.

¹⁰³ O efeito Hall refere-se à diferença de potencial (potencial de Hall) nos lados opostos de uma fina folha de material condutor ou semiconductor na forma de uma 'barra Hall' (ou um *elemento de van der Pauw*) através da qual uma corrente eléctrica flui, criada por um campo magnético aplicado perpendicularmente ao elemento Hall.

O ataque à ponte no primário é feito através de *drivers* normais nos transístores *low side* e de *optodriv*ers nos transístores *high side*. Na ponte de selecção de arcadas usam-se apenas *optodriv*ers, devido à necessidade de isolamento eléctrico.

A geração de alimentações isoladas é feita através de um Flyback na placa de *interface*. Toda a electrónica é sustentada com alimentações provenientes deste sistema. Apenas o microcontrolador dispõe de alimentação quando o sistema de geração de alimentações isoladas está desligado. Existem protecções de picos nas alimentações por *zeners* e varístores.

Existe ainda um regulador de velocidade para a ventoinha feito com uma indutância.

6.2 A BOBINE DE POTÊNCIA

Foi escolhido para núcleo, um núcleo de ferrite¹⁰⁴, em *E* num suporte ETD49. O fio de cobre escolhido é um fio de Litz¹⁰⁵ de tipo 1 enrolado com duas espiras paralelamente como ilustra a figura abaixo.

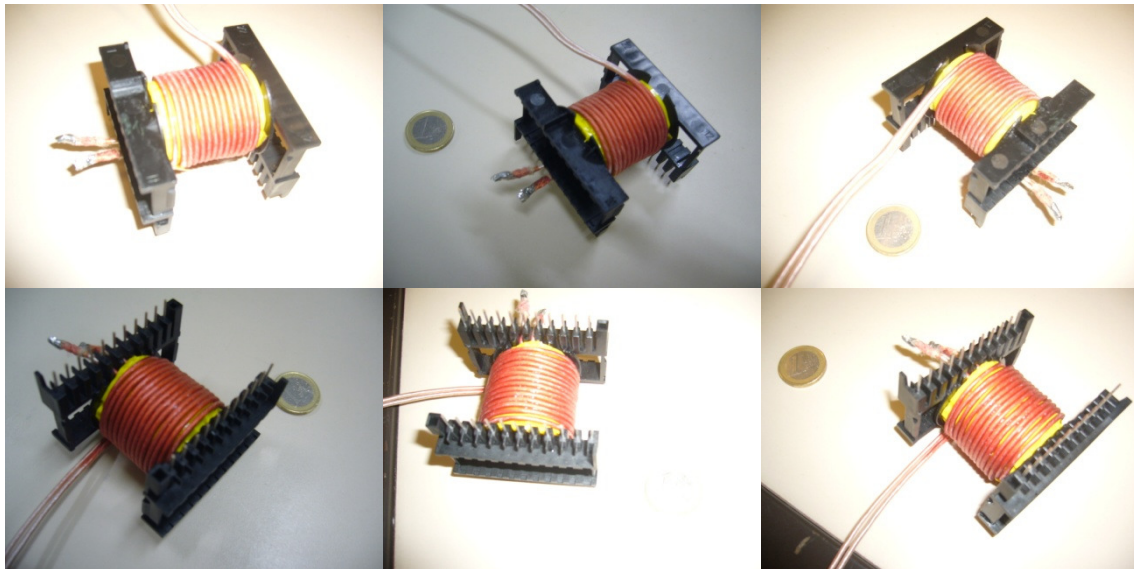


Figura 88: Fabrico da Bobine de Filtragem

As camadas de cada enrolamento foram isoladas com fita amarela de alta protecção térmica e eléctrica, bem como revestidas com uma camada de aerossol (tipo resina) como protecção (contra altas temperaturas) extra.

Os terminais do fio foram revestidos com solda RoHS¹⁰⁶, de modo a agregar cada fino terminal (individualmente isolado) dos enrolamentos.

¹⁰⁴ Ver secção 3.1

¹⁰⁵ Ver secção 3.1.2.9

¹⁰⁶ Directiva Europeia comumente conhecida como *lead-free* (sem chumbo), é uma Restrição a Certas Substancias Perigosas (*Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*) que proíbe que certas substâncias perigosas sejam usadas em processos de fabrico de produtos: Cádmi

6.3 O TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é uma peça fundamental não só no módulo de potência como em todo o inversor. Um dos problemas encontrados que teve de ser ultrapassado foi como fazer um enrolamento primário suficientemente robusto para passar uma forte corrente, num núcleo de largura tão curta, pois (tal como na bobinagem da indutância¹⁰⁷) foi escolhido um núcleo de ferrite em *E* num suporte ETD59 (ligeiramente maior que o da bobine).

Uma solução foi bobinar o primário do transformador com uma larga secção de cobre de largura à medida do núcleo/suporte. Esta banda de cobre foi talhada e trabalhada nas oficinas do Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro.



Figura 89: Suporte do Núcleo ETD59

Começou-se por bobinar o secundário, e neste ponto foi usada uma estratégia algo engenhosa que dotará o inversor de maior versatilidade, ou seja, foram usados dois tipos de fio distintos, que podem ser utilizados conjuntamente ou não, controlando digitalmente uma PCB que basicamente é um relé actuando como “interruptor dos enrolamentos do secundário”. É o conceito de SmarTransformer¹⁰⁸.

A figura abaixo mostra a bobinagem de distintas camadas do enrolamento secundário (os fios coloridos serviram de suporte para prender o fio sem este “escapar” entre camadas de enrolamentos), onde, como referido, foram usados dois tipos de fio distinto. O que se vê na figura é fio de Litz¹⁰⁹ de tipo 3 e é por este que passará a maior parte da corrente, o mesmo estará sempre “activo” pois o *boost* dado pelo SmarTransformer¹⁰⁰ (activando o enrolamento mais fino) só aumentará o enrolamento total do secundário.

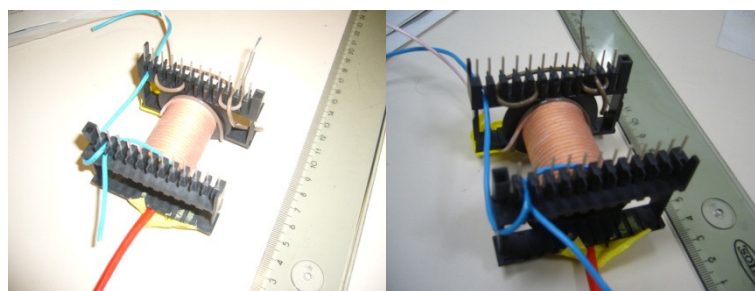


Figura 90: Bobinagem do Secundário – enrolamento grosso

De novo refiro que entre cada camada de enrolamento (desta feita simples e não em paralelo como anteriormente), há uma camada de isolamento de fita e verniz aplicado em aerossol.

¹⁰⁷ Ver secção 5.2

¹⁰⁸ O SmarTransformer encontra-se neste momento em processo de registo de patente por parte da Universidade de Aveiro, para mais informações contactar Prof. Dr. Rui M. Escadas R. Martins

¹⁰⁹ Ver secção 3.1.2.9

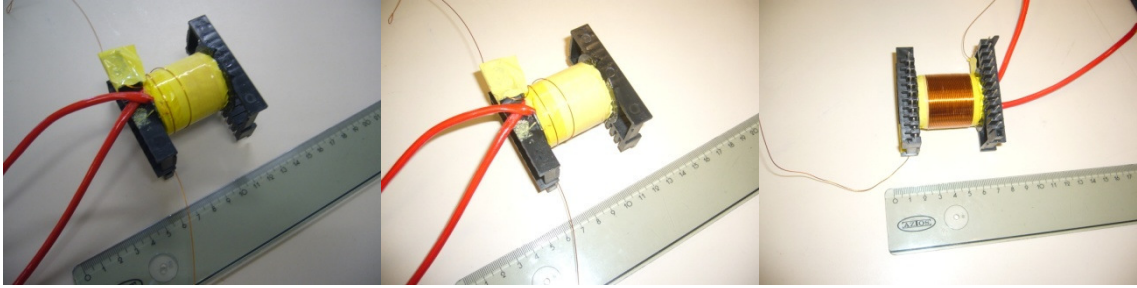


Figura 91: Bobinagem do Secundário – enrolamento fino

Como é perceptível pelas imagens acima, o enrolamento fino do secundário foi separado do enrolamento grosso, por uma camada normal de isolamento. Os terminais deste enrolamento (tal como os do enrolamento grosso) estarão conectados à placa do relé.

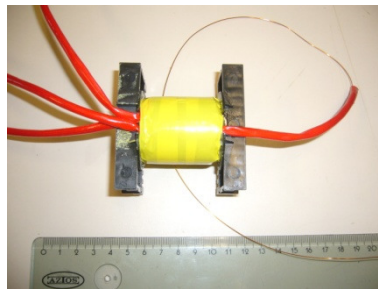


Figura 92: Isolamentos entre Secundário e Primário

Os terminais dos diferentes enrolamentos do secundário foram isolados com manga especial de alta tolerância térmica e espessura aproximada de um milímetro. Foram aplicadas duas fortes camadas de isolamento entre o final do enrolamento do secundário (fino) e o contacto com a placa de cobre que funcionará como primário.

A “tira” de cobre foi coberta com adesivo especial para bobinas, com excelentes propriedades de isolamento eléctrico e térmico. Nas suas extremidades foram feitos cortes de modo a ser possível soldá-las aos pinos do suporte ETD59, como ilustrado nas imagens que se seguem.

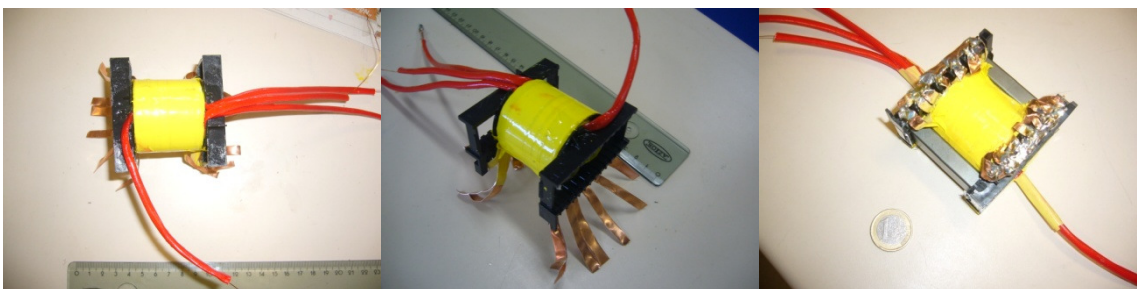


Figura 93: Bobinagem do Primário

Como está patente na última imagem (vista de fundo), as extremidades estão soldadas aos pinos e o núcleo de ferrite depois de colocado ajusta-se perfeitamente a todas as camadas sobrepostas.

6.4 SMARTTRANSFORMER

O SmarTransformer¹¹⁰ consiste num transformador com dois enrolamentos em série de distintas características no secundário que serão ambos usados (ou não) dependendo da actuação num relé. Este selecciona por qual dos dois “caminhos” circula a corrente: ambos os enrolamentos, ou só um deles.

Isto significa que haverá um enrolamento (o mais fino) por onde apenas passará corrente quando a tensão do lado do primário assim exigir. Isto traz, obviamente vantagens a nível de aproveitamento de potência. A actuação/selecção do relé será feita por uma linha a ele conectada, controlada directamente por um pino do microcontrolador.

Em anexo está o esquema eléctrico do SmarTransformer.

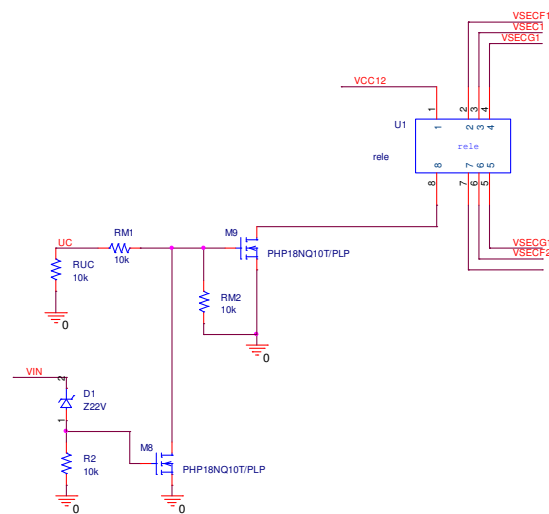


Figura 94: Esquema Detalhado dos Componentes do SmarTrasformer

¹¹⁰ Encontra-se em fase de estudo o registo da patente do SmarTransformer pela Universidade de Aveiro, como parte do trabalho do professor doutor Rui Escadas Martins e seus alunos Ricardo Matias e eu mesmo Tiago Borges Baptista



MÓDULO DE CONTROLO E MÓDULO DE INTERFACE E ALIMENTAÇÕES

7.1 MÓDULO DE INTERFACE E ALIMENTAÇÕES

O complexo módulo de interface conecta o módulo de controlo com o módulo de potência, não havendo qualquer ligação directa entre estes dois últimos. A placa de interface é constituída pelos seguintes blocos:

- Transformador de isolamento e geração de tensões por *Flyback*
- Ataque à ponte do secundário por opto-amplificadores
- Ataque à ponte do primário (e respectiva lógica), por opto-amplificadores e *optodirvers*
- Sensor de tensão de saída e de corrente de saída
- Sensores de temperatura
- Conexão com a placa de controlo (cabo plano de 36 pinos)
- Conexão com placa de interface (primário, secundário, alimentações e saídas)

Toda a electrónica de “baixa potência” está devidamente isolada da parte de alta potência, tendo sido levadas em consideração todas as medidas de *good practice* em design e montagem de circuitos electrónicos: as partes *hot* e *cold* do projecto estão fisicamente separadas na PCB por uma distância conveniente e galvanicamente isoladas (pelo transformador ou pelos acopladores ópticos).

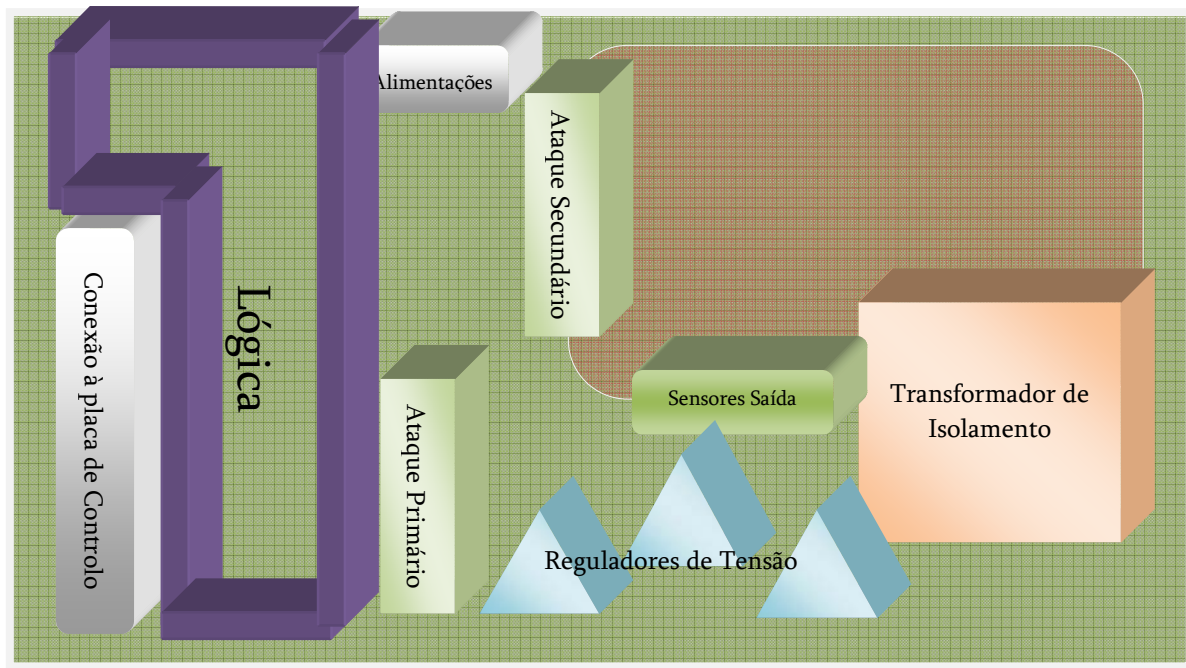


Figura 95: Diagrama da Placa de Interface

Todo o sistema depende em último caso da correcta alimentação pelas tensões geradas isoladamente pelo *flyback*, e posteriormente rectificadas pelos reguladores de tensão e sucessivas filtragens. Os microcontroladores são alimentados a 3,5 Volt, a maior parte da electrónica a 5 Volt (lógica por exemplo) e ataques aos transístores de potência através de opto acopladores ou *optodrivvers* a 12 Volt.

Por conseguinte o sub-módulo do *flyback* é de essencial valor: no estado actual, o PWM que actua na geração das tensões não é dinâmico, isto é, não é controlado automaticamente por *software*, embora isso esteja previsto e de fácil implementação nos próximos estágios de evolução do actual projecto, através da leitura da tensão na entrada e activação/controlo do PWM actuador do *flyback*.

Para os testes efectuados, foi usado um PWM de 35% e 40% com resultados estáveis. No futuro este valor variará com a tensão de entrada. Por estas razões apresenta-se em seguida o esquemático geral exemplificativo da geração de tensões isoladas com mais detalhe.

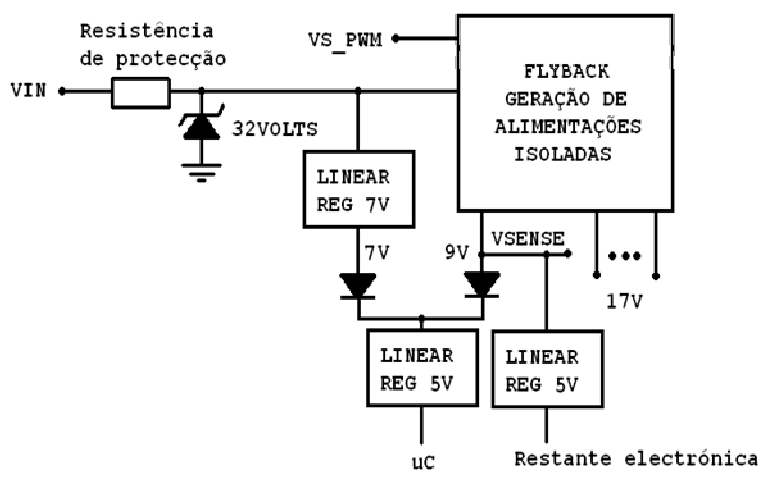


Figura 96: Esquema de Alimentações do Sistema

7.1.1 Transformador de Isolamento e Geração de Tensões (Flyback)

Como já foi referido, este transformador é crucial em todo o sistema, pois isola galvanicamente a parte de alta da parte de baixa tensão. Ainda, é nele que as distintas tensões necessárias a diferentes elementos do sistema são geradas: por exemplo, cerca de 3 Volt para os microcontroladores, 5 Volt para portas lógicas e cerca de 10 Volt para acopladores.

Segue-se o transformador em mais detalhe.

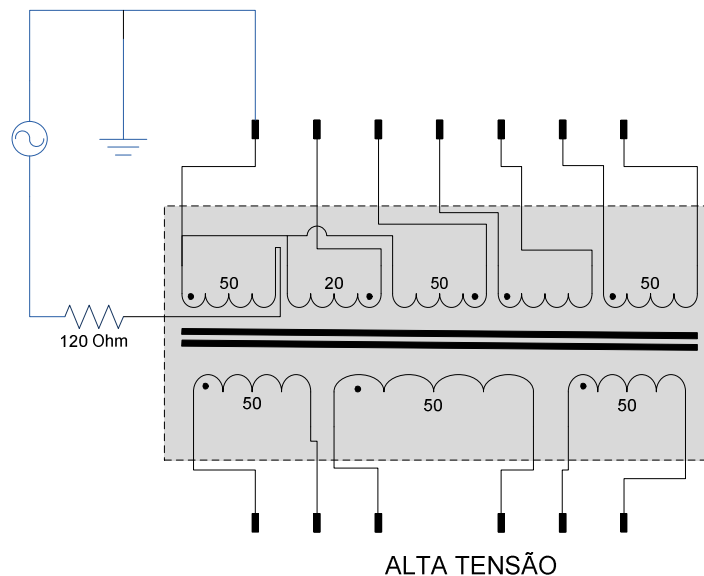


Figura 97: Esquema do Transformador de Isolamento Galvânico e Geração de Tensões (Flyback)

Cujas características são:

$$L_{leakage} = 8,7 \mu H$$

A corrente de fuga refere-se ao primário com todo o secundário em CC.

A $130 kHz$ e com uma tensão aplicada de $10 V_{pp}$ e ainda com a carga ilustrada na figura, resistência de 120Ω :

$$L = 214,5 \mu H$$

7.1.2 Ponte do Secundário

O ataque à ponte do secundário é controlado directamente por dois pinos de saída do PIC. A conectados directamente aos isoladores ópticos (*optocoupler*), o que confere ao “ataque” o isolamento eléctrico necessário, pois o sinal passa de eléctrico a óptico e de novo a eléctrico, quebrando a ligação eléctrica directa entre os dois componentes.

O *optocoupler* escolhido para o efeito foi o HCPL3120 da HP que possui uma corrente de saída de pico $I_o = 2.0 A$.

7.1.3 Ponte do Primário

O ataque à ponte do primário é feito com base no PWM gerado, como amplamente explanado ao nos capítulos anteriores. O pulso passa por portas lógicas adequadas para activar a ponte anti-paralelamente.

Dois dos transístores precisam que o sinal que os activa passe primeiro por um *mosdriver* e nos outros dois o sinal actua no HCPL3120 (similar ao usado na ponte do secundário). Isto acontece devido às diferentes referências de massa para cada um dos ramos da ponte do primário.

7.1.4 Sensores

7.1.4.1 Sensor de corrente de saída

O sensor de corrente de saída está directamente ligado à saída do inversor (módulo de potência) e a corrente é medida através duma resistência de potência de ~~0,15Ω~~ **0,15Ω** com uma queda de tensão desprezável.

De novo este sensor está isolado opticamente, através de um *optocoupler*. É este sensor, que através da informação que transmite ao PIC A, permite ao sistema ser um inversor *grid-connected* pois apenas pelo controlo da corrente de saída se pode sincronizar, em última análise, a potência fornecida pela sinusóide *fabricada* em sintonia com a sinusóide da rede.

7.1.4.2 Sensor de tensão de saída

Este sensor ligado directamente à saída do inversor através de um divisor resistivo, fornece ao PIC A a informação para que o sistema saiba que corrente tem instantaneamente na saída. Em conjunto com o sensor de corrente, permitirá o controlo absoluto sobre a sinusóide gerada e sua sincronia com a sinusóide *pressentida* na rede.

O algoritmo de controlo, actuando no PWM do primário (variando o seu *duty-cycle*) pelos valores lidos dos dois últimos sensores modelará por fim a sinusóide de saída (modelação nas arcadas) e sua potência.

7.1.4.3 Sensores de temperatura

São sensores simples de monitorização de temperatura em cada módulo. Darão informação ao PIC B que controla o sistema de arrefecimento (ventoinha). A ventoinha é controlada também por um PWM que alarga o seu *duty-cycle* conforme mais potência (para o arrefecimento) é necessário.

7.1.5 Conexões

A placa de controlo e a placa de *interface* estão ligadas por um curto vulgarmente conhecido por *flexible flat cable*. Por este é alimentada a placa de controlo e são transmitidos os diversos sinais de controlo entre os dois microcontroladores e a placa de *interface*.

Cold	Hot
Tensão de entrada	Sensor de corrente de saída
Massa de entrada	Sensor de tensão de saída
Sinais de actuação no primário	Sinais de actuação no secundário

Tabela 8: Conexão entre o Módulo de Potência e o Módulo de Interface

A placa de interface e a placa de potência estão ligadas por dois distintos conjuntos de pinos. Obviamente por razões de tensões de isolamentos: um grupo de pinos actua no módulo de potência do lado *high voltage* e outro no análogo lado *cold* de ambas as placas.

7.2 MÓDULO DE CONTROLO

O módulo de controlo, alimenta, opera e conecta os dois microcontroladores: dois PIC24FJ64GA004¹¹¹. Dados os problemas obtidos na primeira versão do inversor, controlado por PICs de 8 bit, optou-se por este modelo, bastante versátil e de 16 bit. Todas as especificações do referido controlador estão no *datasheet* respectivo e por isso não se entrará em detalhe nesse campo desnecessariamente.

A placa em si, recebe uma alimentação rectificada da placa de interface (Reg 5V) que depois é de novo regulada (já na placa menor) para 3,5V. Além do regulador e dos dois PICs, estão presentes ainda 2 conectores DB9, um MAX232 e um MUX, além de filtragens e rectificações várias. Segue-se um esquema simplificado.

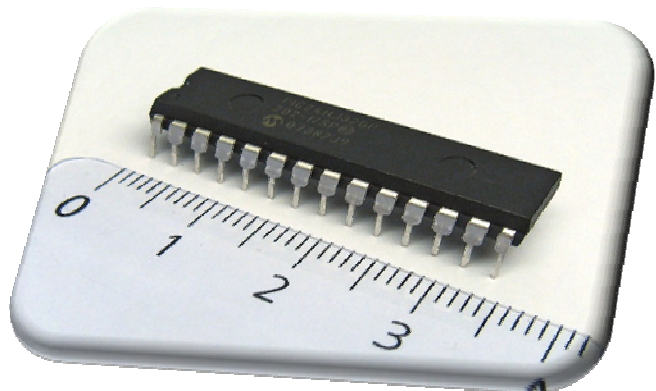


Figura 98: PIC24 da Microchip

Cada um dos PIC está directamente acoplado a um cristal de 10 MHz, que servirá de fonte de relógio externa. Ambos possuem um botão de *reset*. E ambos estão preparados para interligação através do protocolo I2C.[25]

¹¹¹ Do inglês: Programmable Interface Controller ou Programmable Intelligent Computer.

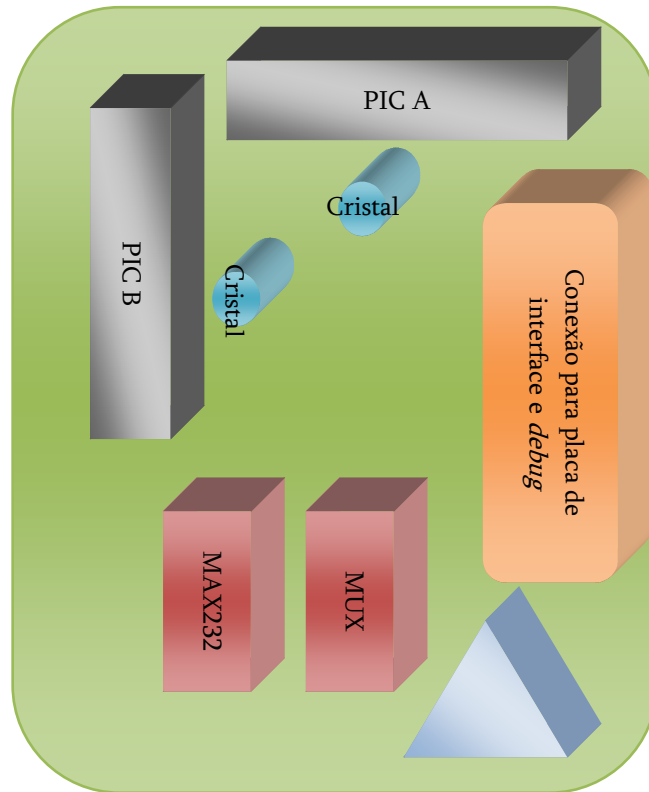


Figura 99: Diagrama da Placa de Controlo

7.2.1 Microcontrolador A

O PIC A controla a tensão e a corrente de saída. É este controlador que através das grandezas de saída actua em ambas as pontes no módulo de potência: modelando o PWM no primário e activando alternadamente a ponte do secundário.

Será este controlador que actuará também nos diferentes enrolamentos do transformador de potência com uma linha dedicada.

7.2.2 Microcontrolador B

Por seu turno o PIC B monitoriza a tensão de entrada (actuando no PWM de *flyback*) para geração sustentada (ou corte) das tensões de alimentação de todo o sistema.

Recebe a informação dos sensores de temperatura e actua no PWM controlador da ventoinha.

Tem ainda 4 pinos dedicados para ligação a um *display* LCD para diversas informações sobre todo o sistema, inclusive informação processada pelo PIC A.

8

SOFTWARE

O *software* desenvolvido¹¹² foi dividido em duas partes, uma para cada controlador:

- O PIC-A, controla o PWM actuador no primário, monitorizando através do seu módulo ADC¹¹³ a corrente na saída (para *grid connected mode*) e a tensão na saída (*stand alone mode*); controla também a actuação (on/off) da ponte do secundário.
- O PIC-B, controla a tensão de entrada e actua no *flyback* modulando o respectivo PWM; controla a ventoinha de arrefecimento; a tensão de alimentação dos PICs, o MUX e está preparado para controlar um display de monitorização do inversor.

Todo o *software* feito foi testado no PIC24FJ64GA002 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** com a frequência do oscilador interna igual a 40MHz. A regularidade das tarefas nas rotinas de serviço à interrupção foi optimizada e verificada com a utilização de bits de portos de saída de testes. As resoluções no PWM e nas leituras da ADC são de 16bits.

¹¹² Todo o *software* desenvolvido se encontra em anexo

¹¹³ Do inglês: Analog to Digital Converter. Um módulo interno do PIC, que faz a conversão de valores de tensão analógicos num determinado pino para um valor digital (em bits)

8.1 PIC-A

Este PIC como referido, é regido por um cristal de 10 MHz de frequência, e está configurado para ter modo PLL¹¹⁴ activo, o que multiplica a frequência de trabalho (ou frequência de ciclo de instrução) quatro vezes. No entanto esta frequência de oscilação (10 MHz) é sempre dividida por dois para encontrar a frequência de trabalho.[25] Assim sendo,

$$F_{cy} = \frac{F_{osc}}{2} \times PLL_{mode}$$

Em que:

- F_{cy} é a frequência de trabalho
- F_{osc} é a frequência da fonte de relógio (10 MHz)
- PLL_{mode} é o factor de multiplicação, que está configurado para o máximo valor nos PIC24 utilizados: 4

Então, F_{cy} é 20 MHz.

Há ainda a possibilidade de usar o *TimerPrescaler*, um modo de operação que permite subdividir (decrementar apenas) a frequência de trabalho do controlador.

8.1.1 Definições e inclusões de bibliotecas

Neste controlador é definido *a priori* um sistema de “pesos” e *offsets* para compensar o ganho e discrepância entre os valores elevados de tensão/corrente de saída que toranará útil toda a programação do controlo.

Ainda é definido uma estrutura que permite, alterando apenas valores no cabeçalho deste algoritmo, variar os valores efectivos de variáveis de controlo: frequência do PWM (actuador no primário), *TimerPrescaler*, *PLLmode*, etc.

Tudo isto são regras de boa prática na produção e legibilidade de *software*, em que não se entrará em detalhe.

HEADER

```
OUTVOLTAGE_CAL_GAIN, OUTCURRENT_CAL_GAIN, OUTVOLTAGE_CAL_OFFSET, OUTCURRENT_CAL_OFFSET
Fosc, Fcy, PLLMODE, TIMERPRESCALE
Fpwm, VOUT, DUTYCYCLEpwm
```

¹¹⁴ Do inglês: Phase-Locked Loop, Malha de Captura de Fase. É um sistema de controlo de realimentação (negativa) que gera um sinal com uma relação de fase fixa com outro sinal de “referência”, podendo aumentar ou decrementar a frequência do oscilador controlado até à sincronização com fase e frequência. No nosso caso, como na maioria da electrónica e micro-controladores, o modo de PLL é activado para incrementar a frequência de trabalho do controlador.

8.1.2 Configurações de Oscilador e Frequência de Trabalho

No PIC24 em uso, o controlo do *clock* de funcionamento é feito por vários registos, dos quais se destaca o *OSCCON* e o *CLKDIV*, registos que impõem o controlo principal do oscilador, seleccionam a fonte do sinal de relógio e permitem comutação entre distintas fontes/divisões da frequência de trabalho ou diferentes escalas.

CLOCK CONFIGURATION

PLL module (XTPLL, HSPLL, ECPLL), Configuration bits
OSCCON
CLKDIV

8.1.3 Inicialização da A/D, Amostragem e Conversão (sem *buffer*)

Como na actual versão, apenas o modo *stand alone* está disponível, a única conversão inicializada é a conversão do valor de tensão de saída, que nas versões de teste, atingiu valores pouco acima dos 400 Volt (DC).

A ADC é inicializada e faz uma amostragem, seguida de uma conversão completa. Recomeçando então esse mesmo processo. É regida por um *timer* interno que a cada rotina de interrupção põe no registo de saída o valor digital da tensão lida no pino pretendido.

LEITURA E CONVERSÃO DA TENSÃO DE SAÍDA

TRISB, AD1PCFG (pinos de *input/output*, analógicos/digitais)
AD1CON1 (módulo ADC1)
IPC3, _ADC1Interrupt (rotina de interrupção e flags)

A frequência a que efectivamente se está a escrever um novo valor digital convertido, tempo de conversão T_c , é dada por:

$$T_c = T_{cy} \times ADCS \times SAMC$$

Em que:

- $T_{cy} = 1/F_y$
- ADCS é o *clock* da conversão analógica, configurado para 4 (a conversão mais rápida seria ADCS = 1, mas não há necessidade de tão rápida velocidade).
- SAMC é o *auto conversion time*, que está configurado para 12 (o máximo é 14)

Então: $F_c \cong 417$ kHz

Optou-se por fazer cada ciclo de conversão a uma frequência superior à frequência a que o PWM afectado à ponte do primário está a trabalhar, 125 kHz. Assim, garante-se que haverá sempre um valor válido e actualizado sempre que o ciclo do PWM for actualizado na execução cíclica do programa em *loop*.

O valor convertido tem 10 bit (o máximo permitido por este modelo de PIC), o que dá uma resolução bastante razoável na gama de tensão admissível, tendo em conta que apenas é possível variar o duty-cycle do PWM em incrementos (ou decrementos) de 1%.

8.1.4 Controlo do Primário

Seguidamente, passa-se ao controlo do PWM actuador do primário propriamente dito. O módulo de PWM do PIC está ligado ao timer2 e como referido, a frequência implementável no cabeçalho do pulso é 125 KHz.

CONTROLO DA PONTE DO PRIMÁRIO

TRISB, AD1PCFG (pinos de *input/output*, analógicos/digitais)
OC1CON (módulo *Output Compare*, PWM)
PR2, TMR2, OC1RS (período, frequência e duty-cycle do pulso PWM)

8.1.5 Controlo do Secundário

Por fim, antes do ciclo interminável do programa, há a activação da ponte do secundário, cuja função é inverter as arcadas, gerando assim a pretendida sinusóide AC a 50 Hz.

CONTROLO DA PONTE DO SECUNDÁRIO

TRISB, AD1PCFG (pinos de *input/output*, analógicos/digitais)
PR3, TMR3 (período, frequência da comutação da ponte)

8.1.6 Regulação em *loop*

O algoritmo de controlo, consiste num *loop* interminável em que a ponte do secundário é posta a comutar a 50 Hz (ou estática nesta versão de testes, controlo DC apenas), e o PWM do primário varia em função do valor convertido da tensão de saída (modo *stand alone*)¹¹⁵.

¹¹⁵ No ideal modo *grid connected*, a regulação será feita com base na corrente de saída preferencialmente e não na tensão de saída apenas. O processo é precisamente igual em termos de algoritmia.

ALGORITMO DE CONTROLO

LATBbits (pinos de comutação do secundário *on/off*)
 ADC1BUF0 (tensão/corrente de saída, convertida para digital)
 Comparação e actuação no duty-cycle do primário (com ou sem *delay*)

8.2 PIC-B

O PIC-B atacado por um cristal de 10 MHz tal como o PIC-A tem toda a sua configuração do oscilador igual, pelo que não se entrará em grandes detalhes quanto a *clock define*, pois em nada difere do apresentado no ponto 7.1.

8.2.1 Definições e inclusões de bibliotecas

Neste controlador é também definido *a priori* um sistema de “pesos” e *offsets* para calcular valores de tensão de entrada e como na programação do controlador anterior, são seguidas as mesmas regras de nomenclatura e organização de código.

HEADER

INVOLTAGE_CAL_GAIN, INVOLTAGE_CAL_OFFSET
 Fpwm_fly
 Duty_Fly

8.2.2 Configurações de Oscilador e Frequência de Trabalho

No PIC24 em uso, o controlo do *clock* de funcionamento é feito por vários registos, dos quais se destaca o *OSCCON* e o *CLKDIV*, registos que impõem o controlo principal do oscilador, seleccionam a fonte do sinal de relógio e permitem comutação entre distintas fontes/divisões da frequência de trabalho ou diferentes escalas. Ver 7.1.2.

CLOCK CONFIGURATION

PLL module (XTPLL, HSPLL, ECPLL), Configuration bits
OSCCON
CLKDIV

8.2.3 Geração das Tensões de Alimentação

O *flyback* funciona apenas com a modulação PWM actuando na porta de um transistor nMOS, através de um *optodriver*. O *duty-cycle* é ajustável em pontos percentuais, com uma resolução máxima de um ponto.

Nesta versão o *PWMfly* está fixo a 35% e tem uma frequência de 125 kHz, impostos pelo *timer2*.

CONTROLO DO FLYBACK

TRISB, AD1PCFG (pinos de *input/output*, analógicos/digitais)
OC1CON (módulo *Output Compare*, PWM)
PR2, TMR2, OC1RS (período, frequência e *duty-cycle* do pulso PWM)

8.2.4 Regulação em *loop*

O algoritmo de controlo, consiste em monitorizar a tensão de entrada do sistema, e activar/desactivar o *flyback* (e consequentemente as alimentações de todo o sistema) concordantemente.

Este controlo não está implementado, no entanto a estrutura para esse efeito está salvaguardada. O objectivo é variar o *duty-cycle* do PWM no *flyback* de modo a manter constantes e estáveis as tensões isoladas, apesar das variações na tensão vinda do aerogerador. Obviamente abaixo de um determinado valor, não haverá qualquer PWM válido capaz de gerar pelo *flyback* tensões adequadas para o sistema arrancar/funcionar.

ALGORITMO DE CONTROLO

ADC1BUF0 (tensão/corrente de entrada, convertida para digital)
Comparação e actuação no *duty-cycle* do *flyback*



TESTES, DESEMPENHO E AFINAÇÃO

Relembra-se que a versão em testes actual resulta da evolução e afinação duma primeira versão de um inversor de 2007. A primeira versão da placa de circuito tem muitas ligações dispersas e o sistema muito dividido em termos de circuitos. Foram detectados alguns erros nas ligações. Embora o encapsulamento já estivesse estudado e as questões de segurança eléctrica pensadas, chegou-se à conclusão que para encapsular era melhor construir uma nova versão, com as correcções necessárias: a versão actual. No caso em questão concluiu-se que era pouco seguro testar o sistema com tensões altas, sem ser devidamente encapsulado. Era necessária também a instalação dos sistemas de dissipação térmicos.

No teste à escala, a relação de transformação do transformador do inversor foi reduzida e foi usado um transformador de isolamento entre a rede e o inversor, para efectuar o ajuste de níveis de tensão. As massas do primário e do secundário foram ligadas porque os sensores foram simulados por circuitos simples, baseados em resistências e *OPAMPs*.

No *software* de controlo não se implementaram os controlos da temperatura, da ventoinha e de potência extraída da fonte. O procedimento de detecção de erro de controlo não está completamente implementado.

9.1 TESTES DE CONTROLO

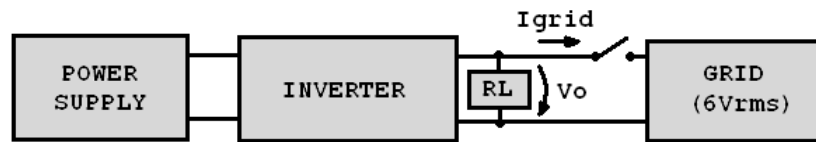


Figura 100: Procedimento de teste de controlo (*stand alone*)

O procedimento de teste *stand alone* consistiu basicamente em ligar o inversor a várias cargas resistivas e ver se este mantém a tensão de saída dentro da gama permitida. Um próximo teste, depois de afinar o algoritmo, seria simular cargas não lineares e ver qual o comportamento do inversor.

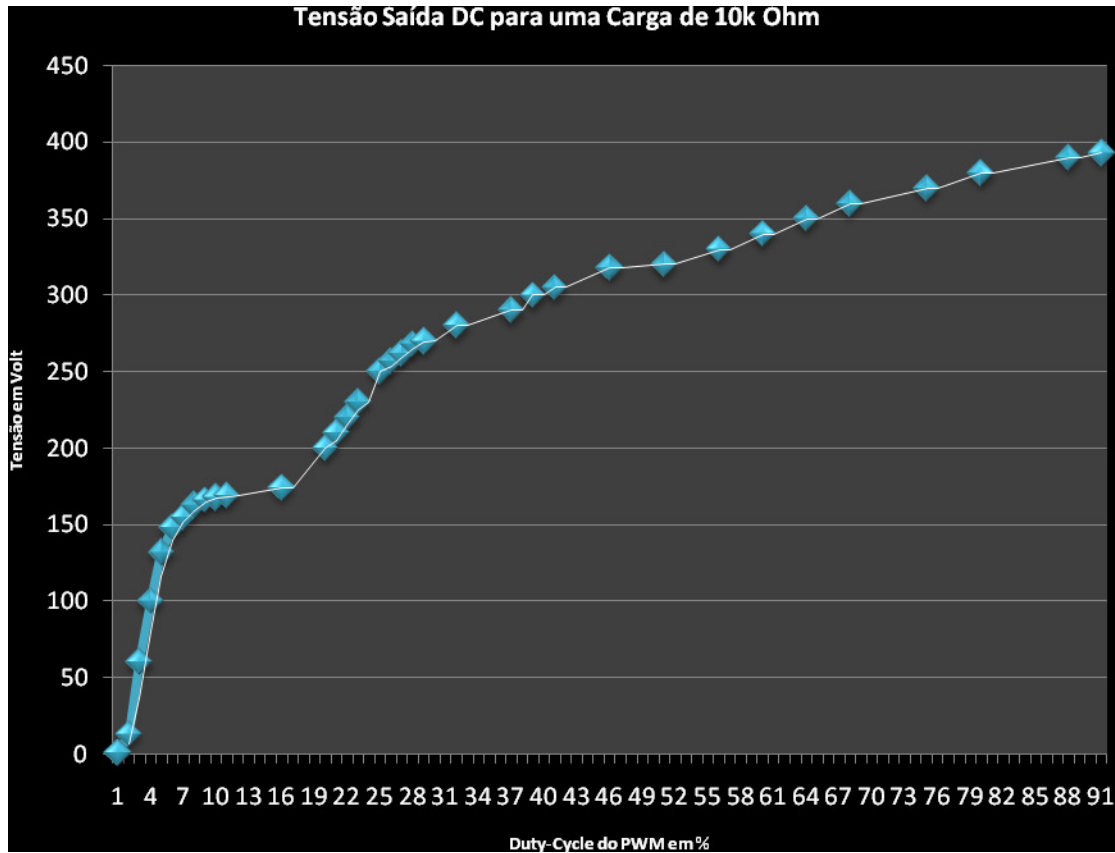
O enfoque foi em perceber precisamente qual a variação na tensão de saída (DC) com variação por ponto percentual no PWM do primário. Na primeira parte do teste, a carga era fixa, de 10 k Ω , e variando acompanhadamente o *duty-cycle* no primário descrever o comportamento da tensão na saída.

Na segunda parte do teste, já com o algoritmo adaptativo, o *duty-cycle* do PWM no primário foi variado de modo a manter constante um valor de tensão na saída, monitorizando a mesma. A tensão na saída era obviamente afectada pela variação da carga: um reóstato (de 0 a 300 Ω) em paralelo com 10 k Ω .

9.2 AFINAÇÃO

Os resultados do efeito da variação da tensão de saída do *duty-cycle*, para uma carga de 10 k Ω estão expressos no gráfico que se segue. Com o gráfico, pretende-se demonstrar que a variação da tensão de saída com o *duty-cycle* está longe de ser linear: há zonas em que uma pequena variação no período a *on* produz uma forte variação na saída.

Por razões de segurança evitou-se aumentar o *duty-cycle* acima de 90%.

Figura 101: Tensão DC na Saída em Função do *duty-cycle* na Ponte do Primário

Como é fácil de constatar, e estando limitados a variações de um ponto percentual no *duty-cycle*, para uma carga de 10 k Ω , é extremamente difícil controlar a tensão de saída abaixo dos 15 Volt, pois nessa região há poucos pontos de controlo.

Para uma carga variável, entre 290 Ω e 10 k Ω foi conseguido satisfatoriamente manter a tensão de saída estável e constante a 80 Volt e a 100 Volt, com a o algoritmo implementado. Prova-se assim o funcionamento do *hardware* em regime DC.

10

SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados mostram a plausibilidade de todo o conceito. Faltou testar e implementar todo o modo *grid connected*. Para isso há que construir a versão 3, afinar tudo e depois montar numa caixa, para testar em ambiente real. Há muita coisa a afinar, nomeadamente no que respeita ao mecanismo de extracção de máxima potência da fonte, os deltas dos algoritmos de controlo, *snubbers* e filtragens. O procedimento de teste *grid connected* terá de passar por ligar o inversor a um transformador de 50Hz.

10.1 SUGESTÕES SOBRE NOVAS FUNCIONALIDADES

Implementações em falta:

- Activação do SmarTtransformer
- Activação de sensores de temperatura
- Regulação de *PWMflyback* vs Tensão de entrada
- Estabilização do *flyback*
- Implementação de *self-tests*
- Assemblagem de fusível de entrada
- Montagem de caixa e carapaça exterior com ventoinha
- Modo *grid connected AC*

É fortemente recomendado um *redesign* de toda a placa de *interface* para simplificação e optimização de *hardware*.

Como sugestões futuras:

- Ajuste de corrente às necessidades da rede. Compensação de deformações na tensão
- Sistema genérico para ajuste a um dado gerador de energia
- Sistema de ligação de unidades em paralelo (para conseguir maiores potências)
- *Firmware Updates*

10.1.1 *Magic Sine Waves*

Para modelar sinusóides existe outro tipo modulação de pulsos que geram menos harmónicos e tornam a filtragem muito mais fácil. As sinusóides geradas por esses pulsos são chamadas *magic sine waves*.^[15]

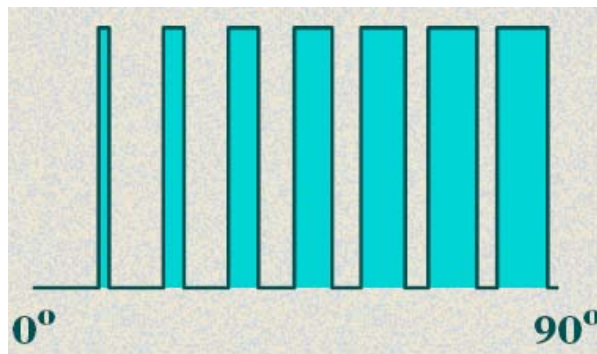


Figura 102: Aspecto dos pulsos de geração de uma *magic sine wave*

Este assunto requer *further study*

10.1.2 Conversores ressonantes e tecnologia planar

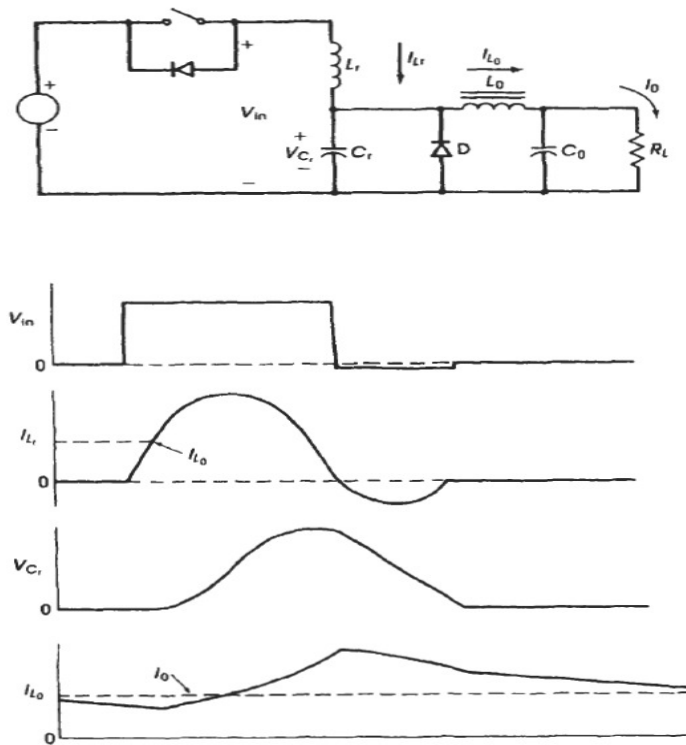


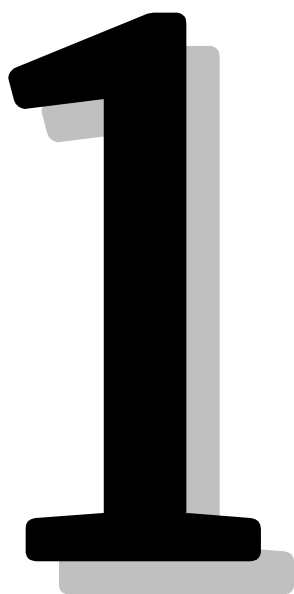
Figura 103: Ideia sobre conversores ressonantes

Os conversores ressonantes têm menos perdas de comutação porque são feitos para os *switches* comutarem quando a tensão é zero.

10.1.3 Novos Simuladores, Simulações e Procedimentos de teste

Como sugestão, deixa-se os seguintes tópicos:

- Sistema de simulação de fontes de entrada.
- Sistema simulador de cargas.
- Sistema simulador de inversores.
- Sistema simulador de rede com inversores.
- Construção física de simuladores electrónicos.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

11.1 WEBSITES

- [1] www.farnell.com
- [2] www.ferroxcube.com
- [3] www.national.com
- [4] <http://www.selfenergy.eu/>
- [5] www.tinaja.com
- [6] www.ginlong.com
- [7] www.ieeta.pt/~alex/ensino/epotteoricas.html
- [8] www.fnrf.science.cmu.ac.th/FrameTop.html
- [9] www.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/#wire
- [10] store.altenergystore.com/Inverters/c497/
- [11] www.newenglandwire.com/litz.asp
- [12] www.renovaveisnagora.pt/
- [13] www.mctes.pt

[14] www.iec.ch/

11.2 TEXTOS

- [15] *Relatório final de Projecto de 5º ano — Projecto de Inversor de Potência*, Ricardo Matias, 2007
- [16] *A bidirectional, sinusoidal, high-frequency inverter design*, E.Koutroulis, J.Chatzakis .Kalaitzakis and N.C.Voulgaris
- [17] *SPICE Models For Power Electronics*, L.G. Meares and Charles E.Hymowitz
- [18] *Linear & Switching Voltage Reference Handbook*, ON Semiconductor, Fevereiro 2002
- [19] *Regulator Fundamentals*, Chester Simpsont
- [20] *National Semiconductir, Linear and Switchng Voltage*
- [21] *National Semiconductor, Application Note 556*, Setembro 2002
- [22] *Revista O Electricista*, nº9, 3º trimestre de 2004, ano 3
- [23] *Eddy Current Losses in Transformer Wiring*, Lloynd H. Dixon
- [24] *Textos de Apoio – Electrónica de Potência*, Alexandre Mota, v0.96
- [25] *PIC24FJ64GA004 Family Data Sheet*, Microchip

11.3 LIVROS

- [26] *Switching Power Supply Design*, Abraham I. Pressman, McGraw-Hill
- [27] *High Frequency Transformer for Switching Power Supplies*, Fu Keung Wong
- [28] *Pratical Switching Power Supply Design*, Marty Brown, Academic Press
- [29] *The Power Electronics Handbook*, CRC Press
- [30] *Power Electronics Handbook*, Academic Press
- [31] *Power Electronics 2nd Edition, Converters, Aplications and Design*, Mohan Undeland, Robbins, WILEY
- [32] *Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks (Power Systems)*, Ryszard Strzelecky, Grzegorz Benysek, Springer

- [33] *Fundamentals of Power Electronics*, Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, Springer
- [34] *Control in Power Electronics: Selected Problems (Academic Press Series in Engineering)*, Marian P. Kazmierkowski, Ramu Krishnan, Frede Blaabjerg, J. D. Irwin
- [35] *Integrated Power Electronic Converters and Digital Control (Power Electronics and Applications Series)*, Ali Emadi, Alireza Khaligh, Zhong Nie, Young Joo Lee, CRC Press
- [36] *Power Supplies Switching Regulators, Inverters and Converters 2nd Edition*, Irving M. Gottlieb, TAB Books
- [37] *Wind Energy Handbook*, Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, WILEY
- [38] *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Siegfried Heier, WILEY

12

ANEXOS

12.1 ENTIDADES INSTALADORAS REGISTRADAS

Nome	Morada	Localidade
2M Comércio e Serviços de Electricidade, Lda	Zona Industrial, Lote 48	Albergaria-A-Velha
A. BÉCO & FILHOS, LDA BÉCO	Rua da Bandeira, n.º 39	AVANCA
A. M. Ribeiro, Lda	Edif. Termas de S. Vicente, Bl 2, Lj G	Aveleda
A. Santos - Electricidade, Lda A. Santos - Electricidade, Lda	Rua Padre Dr. Fernando Mauricio, Lote 13	Benedita
A.COUTO,Lda Natural Energy	Zona Industrial de Nelas	Nelas
A.Jesus Instalações Eléctricas e Canalizações, Lda A. Jesus	Rua Carlos Seixas nº9 4ª cave	Coimbra
Afonso Camacho Lda	Rua da Figueira Preta, 17 - 1º	FUNCHAL
Albino Monteiro de Magalhães, Lda Magalhães	Costa - Mancelos	Mancelos
ALBUQUERQUE & FREITAS, S.A VOLTER	Av. Luis Martins	Repeses
ALGARVOLT INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS E DE TELECOMUNICAÇÕES LDA.	RUA VEREADOR FILIPE JONAS, EDIFÍCIO SIROCO LOJA 1A	QUARTEIRA
ALMEIDA & SANTOS LDA ALMEIDA & SANTOS LDA	RUA DO SACRAMENTO Nº8	CALDAS DA RAINHA
Alsolar,Lda. Firma	Parque Industrial, Lote 30	Boavista dos Pinheiros
Alvaquece Instalação Eléctrica U. Lda	Zona Industrial, Lote A2, Cave Esquerda	Oliveira do Hospital
AM - Montagens Eléctricas, Lda. AM, Lda.	Rua Luís de Camões, 171	Guardedeiras
AMG INSTALAÇÕES ELECTRICAS LDA.	LUGAR DOS BARROCOS	CASTELÕES - RECEZINHOS
AMORIM&CRUZ- CONSTRUÇÕES,LDA AMORIM&CRUZ,LDA	RUA SÃO JOÃO DE SOBRADO Nº 4701 R/C	SOBRADO

Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia

Amorlux Projectos e Instalações Eléctricas, Lda	Rua Qta das Rosas, Nº 17	Aldeia de Paio Pires
Amplitude Termica -Unipessoal Lda	Estrada da Taboeira, nº14 - 2 Dto	Aveiro
Anibal Palma Ida	Sítio dos Calíços Esteval Cx.P 203	Loulé
António Costa Lopes Matos	Casal Pinheiro, Nº3	Tomar
Antonio Fernando Neves, Electricidade Estudos e Projectos Electricos, Lda	Rua Cidade de Rio Maior Nº 5 - Cidral	Rio Maior
António Nogueira Ferreira	Rua D. José I, 101	Alameda
Apelmei - Montagens Eléctricas, Lda. .	Rua Parque Bouça das Mouras	Lomar
APESEN Lda.	Rua Álvaro Castelões, nº 6	Montemor o Novo
Aqueciliz Climatizações, Lda	Rua das Flores nº17	Grinde
Aramus Lda Aramus Lda	Urbanização Quinta São Gonçalo, Passeio da Rua Itália nº 7	Carcavelos
ARMINDO TELES & MAGALHÃES LDA	QUINTELA REGO	CELORICO DE BASTO
ASH Instalações Técnicas Especiais	Rua Abel Salazar, 40-A	Lisboa
ATO Electroportolux, Lda. ATO Electroportolux, Lda.	Bairro Sr. dos Afritos nº8 (zona industrial)	Valpaços
Automatex-Equipamentos Industriais,Ld Automatex	Rua de Forjães,N.º297	Lamelas
AVAL Comercio e Representações Lda	Rua do Casino, 165, Armazém 4	Bairro
AYT MONTAGENS ELÉCTRICAS, S.A.	RUA DO SOUTO LONGO, 229	ARNOSO (STA MARIA)
Balfer electricidade e telecomunicações, Lda	Zona Industrial do Paul	Paul
Barata e Marcelino, Lda Instalações Eléctricas	Adémia	Coimbra
Barreiros, Costa & Sampaio, Lda Barreiros, Costa & Sampaio, Lda	Zona Industrial do Neiva, II Fase, Lote 12	Neiva
Baselétrica, Lda .	Rua Vale Formoso de Cima, nº 127 A	Lisboa
Be Free - Energias Renováveis Lda	R. Pedro Alvares Cabral nº 47, apt 213	Carcavelos
BIGSOLAR ENERGIAS RENOVÁVEIS, LDA	R. ROSMANINHAL Nº5 / AV CIDADE SALAMANCA Nº48	GUARDA
BIOESPAÇO ENERGIA	rua Alves Redol LT, 5 Escr3	Odivelas
BONGAS COMBUSTÍVEIS DE AVEIRO BONGAS	APARTADO, 3063	ESGUEIRA
BRAGALUX - MONTAGENS ELECTRICAS, SA BRAGALUX, SA	Rua dos Torrados, 30	Palmeira
Braz Mendonça da Conceição, Lda	Rua Dr. Miguel Bombarda, 58	Caldas da Rainha
BVV Instalações Eléctricas, Lda. BVV	Rua Dr. João Porto nº 9 - A	Carnaxide
Canalizações e Equipamentos Lopes, Id Canalizações Equipamentos Lopes	Rua da Cerca, nº 94	Barreiros
Canas Electro-Montagens S.A.	Rua do Ferrador, 11	Paão
CAPA - Engenharias e Construções SA CAPA - Engenharias e Construções SA	Rua Ribeiro Cambado, 1491 Alto da Serra - Apartado 31	Valongo
Carlos FG Filipe Inst. Eléctricas Pro Filipe	Rua Prof. Santos Lucas, 24, R/c	Lisboa
Carlos Manuel Guarda Azoia	Rua Sr. dos Milagres n.421	Pingarelos - Milagres
Catelatecnica Automação Ind. Inst. Eléctricas-Soc.Unipessoal,Lda	Pq Ind.Biquinha e Alamo, Lt 114	Conceição
Chatron Equipamentos Electrónicos, Lda	Lugar Rossio	Rossio
Cidade Solar Energias Renováveis, Lda	Travessa das Zebras, 27	Lisboa
CINERBEG, SA CINERBEG, SA	Rua Azeredo Perdigão, Bloco 5B Cave	Bairro do Serrado, Viseu
CIRCUITOS DE INOVAÇÃO SOLUÇÕES ENERGÉTICAS UNIPESOAAL, LDA.	AV. DR. ANTÓNIO RANGEL 50 APT.173	REBORDOSA
Clear Instalações Eléctricas, S. A	Rua Santos Pousada, 220 - 7º	Porto
Climalentejo, Lda	Rua do Monte Novo, Nº 11	São Bento do Ameixial
Climasol Instalações de Aquecimento, Lda	Zona Industrial das Cantarias Lote 133 Apartado 1201	Bragança
CME Construção e Manutenção Electromecânica, S.A.	R. Rui Teles Palhinha, 4 - 3º	Porto Salvo
COLARINHA - Sociedade de Estudos e Montagens Eléctrica, Lda	Rua João Frederico Ludovice, n.º 30 R/ch Dtº	Lisboa
Consolenergia Lda	Avenida da Praia, 14	Lugar da Estrada

Construções Edgar Miller, Lda. Construções Edgar Miller, Lda.	Av. Estados Unidos da América, n.º 100, 5.º Esq.	Lisboa
Corrente Rosa Lda. Corrente Rosa	Av. D. João II, nº51	Nogueiró
CPFL Construções Pereiras e Flores Lda	Praça Mota Veiga 2A	Santa Maria dos Olivais
Crescente Luminoso Instalações Eléctricas, Lda	Rua das Leiras, Nº 14/16	Pq Poente Sequeira
Cruztel, Lda Telecomunicações e Electricidade	Apartado 2096	Évora
Cunha Bastos, Lda	Roteia 4905-239 Carvoeiro VCT	Carvoeiro
CUNHA SOARES & FILHOS, SA	ALMINHAS	GALEGOS
CUSTÓDIO & TOMÉ, LDA CUSTODIO & TOMÉ, LDA	RUA DAS ACÁCIAS 40A	SÃO PEDRO
D. Medeiro Equipamentos Eléctricos, Lda	C. de Emp.e Serviços de Vilamoura, Lt. 44	Quarteira
Dape, Lda	E. N. 101 - Av Barros e Soares, 466 CV	Nogueira
DARPESUI, Projectos e Construção, Ld	Goldra de Baixo, Apartado 219	Santa Bárbara de Nexe
Dars Engenharia uni, Lda Dars Engenharia	Touvedo São Lourenço	Ponte da Barca
De Viris, Natura e Ambiente S.A.	Estrada de Alfragide, Nº 67, Alfrapark - EDF F Sul Piso 3	Alfragide
Deomarsol Lda	Edifício Triangular – IC 2, Trav. José Augusto Frutuoso, Lt 7, Nº 4	RELVINHA
Detenergia Unip. Lda. Des. Eng. em Telecomunicações e Energ	Rua das Filipinas Q. 42 Lote 7 R/C	Amadora
Diferencial - Electrotécnica Geral Lda	Estrada da Murta	Oliveira do Bairro
Dionísio Faria & Silva, Lda	Rua Freiras de Santa Clara, nº 70	Vila do Conde
Domingos da Silva Teixeira - Empreitadas Eléctricas, S. A.	Apartado 208 - 4711-911 Braga	BRAGA
Domodelta Instalações Electrotécnicas Domodelta	LUGAR CAMINHO DO TERRAÇO, Nº15	Funchal
Dr.Sol - Energia Solar e Climatização, Lda Dr.Sol	Rua Sta. Isabel, Lt. 2 R/C Esq.	Repeses
E.I.P. - Electricidade Industrial Portuguesa E.I.P. - Electricidade Industr	Av. Duque Loulé, 110	Lisboa
E.T. - Electricidade e Telecomunicações, Lda	LOTEAMENTO QTA. DA VARZEA - LT. 8 - CV	CANHOSO
E3R - Eficiência Energética e Energias Renováveis, LDA	Rua do Alto	Santa Marta de Penaguião
Ebinstal Instalações Especiais Lda	Edifício São Marcos 1Dto N.º 6	Vale de Canas
Edifer Construções,SA Construções Pires Coelho & Fernandes	Rua das Fontainhas, 62	Amadora
Edilages, Lda Edilages	Rua Pedreira das Lages	Guilhufe - Penafiel
Efacec Engenharia, S. A	Rua da Garagem, 1	Carnaxide
Egitécnica, Técnico Construtora SA. Egitécnica	Rua Calouste Gulbenkian, 2º 3º Bloco, R/c	Guarda
EGTON Ins. Electricas Gás Telecomunicações	Rua dos Pinherinhos nº104 Ed. Gian Sala A R/Ch	Vale do Grou
EIE, Lda Electricidade e Instalações Especiais	Rua António dos Santos Coelho,14A	Falagueira
EIXO, Lda Est. Projectos Electricidade	Rua do Município-Lote 53	Portela da Azóia
Electrificadora Alvoserra, Lda	Alvoco da Serra,	Seia
Electrificadora Ideal do Tâmega, Lda Elital	Av. Alexandre Herculano - nº442 - Madalena - Amarante	Amarante
ELECTRIVISEU, LDA Electriviseu, Lda	Urbanização Poço do Lobo, Lt 49, R/C Dtº	Póvoa de Sobrinhos
ELECTRO ALHEIRA INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS, LDA	TRAVº ALHEIRA DÀQUÉM 157	PEDROSO V.N.GAIA
Electro Antunes Lda Antunes	Rua Damião de Góis nº191-193	Cividade
ELECTRO BARRO Instalações Eléctricas Lda	Rua do Comércio, 34 - R/C-A	Bairro Novo do Trígache
ELECTRO BELARMINO, LDA	ZONA INDUSTRIAL, LOTE 42 APARTADO - 450	FUNDÃO
ELECTRO CAMPO,LDA ELECTRO CAMPO, LDA	RECTA DA GRANJA - PARQUE RASO - ARMAZÉM E	CAMPO RASO
Electro Central Vulcanizadora, Lda.	Rua Conselheiro Martins Carvalho, 1480	Lisboa
Electro Martins, Lda Instalações Eléctricas BT e MT	Urb. Quinta dos Machados, lote 63	Moita
ELECTRO PISCA LDA.	Rua Cruz d'Argola, nº208	Mesão Frio
Electro Planicie, Lda.	Rua D. Nuno Alvares Pereira, 1	Beja

Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia

Electroavioso-instalações electricas manuel pinto	Rua Dr cARLOS SILVA MOUTA 250 2º C	Santa Maria De Avioso- maia
Electrolagos Cooperativa dos Trabalhadores Electricistas de Lagos, C. R. L.	Rua Castelo dos Governadores, 66	Lagos
ELECTROLUDI, INSTALAÇÕES ELÉCTRICAS, LDA ELECTROLUDI	ZONA INDUSTRIAL DE GOUVEIA - LOTE 3	GOUVEIA
Electrotecnica das Caldas, Lda Electrotecnica das Caldas, Lda	Rua Diario de Noticias, VV. Anacleto - Casal Belver	Caldas da Rainha
Electrotejo, S.A Instalações e Montagens Técnicas	Rua do Matadouro, n.º 8	Almeirim
Elergone Energia, Lda. Elergone	Rua de Almeiriga, 586	Leça da Palmeira
Elísio Paulo & Azevedo, Lda Paulo	Rua Domingos Monteiro, Nº572	Moses
Elitua, Teleco. e electricidade, Lda .	Zona Industrial	Mirandela
Elmi,Lda Electricidade e Manutenção Industrial	rua da Escola Primária 12B	Cova da Piedade
Eltef Eltef	Urnaização Vila Formosa Rua Antero Nobre	Olhão
Emponor - Empreitadas do Norte, Lda. Artur Teles	Parque Industrial de Mide, Lote 13 - apart 50	Lordelo
ENAT Energias Naturais, Lda	Rua Marquês de Pombal	Sabugal
Endovélico Energias Renováveis, Lda.	Rua Combatentes da Grande Guerra, 32B 1ºK	Aveiro
ENE Energias, Lda. Electricidade e Energias Renovaveis,	Rua José Rocha 610	Mafamude
ENELAZE , Lda. Eng., Serv. e Com. de Mat. Eléctrico	Rua Mario Sá Carneiro, nº 3	Brejos de Azeitão
Energias Renováveis Fafebasto, Lda ERF	Av. Tenente Coronel Melo Antunes nº26	Fafe
ENERGICOURA LDA. ENERGICOURA LDA.	R. Dr. Aquilino Ribeiro Bloco 10 Loja 1-2	Paredes de Coura
ENERGLOBO, Energias Limpas, Lda ENERGLOBO	Av. Sá Carneiro, 342 - R/C	Bragança
ENERGUA - ENGENHARIA ELECTRICIDADE E TELECOMUNICAÇÕES LDA	ZONA INDUSTRIAL FOJO , PAV 15	CARREIRA
Energypop Instalações Eléctricas e Topografia, Lda.	Rua de Sto António, Nº 710/742 Arz J	Sta Maria de Avioso
Enernatura, Lda Enernatura	Rua do Padrão nº 198	Coimbra
ENERSIE - ENGª E GEST. REC. ENER. LDA LDA	R. SANTOS DIAS, 1537	MATOSINHOS
Enforce, Engenharia da Energia SA Enforce, Engenharia da Energia SA	Park Decor-C.Inov.Negócios - Pq.Ind.Covilhã, Lote C6	COVILHÃ
Engemalia Lda. Eng e Montagens Electrom. Indu. Unip	Estrada Nacional 109 Cabeço do Marco S/N	Brenha
ENGIMAGNE, LDA ENGIMAGNE, LDA	AV D. MARIA DO CARMO CARMONA, 57-A	VALPAÇOS
Engitagus Engenharia e Construção,Lda	Estrada da Ribeirinha- Alcoparque1- FracçãoA	Alcolombal
Ensul Mec Gestão de Projectos de Engenharia, S. A	Rua do Facho, 26	Monte da Caparica
EPME Empresa de Montagens Eléctricas, S. A.	Pct.da Castanheira, Apartado 222	Maia
ERGES Lda	Zona Industrial da Taboeira Lote 30 FracçãoB	Aveiro
ERGOS Novas Energias Lda ERGOS	Rua da Argila, nº 314	Alfena
ERI - Engenharia, SA ERI, SA	Praceta da Castanheira, 15 - Apartado 1293	Barca
ERTEC Lda	Rua São João Batista, Edifício Terra Verde, nº 721	Ponte
ESITE,LDA ESITE,LDA	Rua Dr. António da Rocha Madaíl, 33-35	Aveiro
EST Empresa Serviços Técnicos, Lda	Rua da Granja, 10-B	Boa Vista
Eurico Ferreira, S.A.	Apartado 282	Trofa
Euroel Lda.	AV. Do Brasil, 3425 - Edº Quinta da Maia, Lj 11	Antas
Europower Engenharia Lda	Urb jardins de Loulé, It12 3ºdto	Loulé
F. V. M. C. Comércio de Materiais Electricos e Instalações Eléctricas, Lda	Av. Da Republica, 29 A - Rc	Moura
FARADEI PROJ. E MONT. ELECTROTECNICAS, LDA.	RUA FERNANDO MAURICIO, N.º 37 - LOJA DTA.	LISBOA
Ferraria Montagem e Instalações Eléctricas e Actividades Afins, Lda	Rua Tuna, 116,	Vilar Andorinho
FF Sistemas de Energias Alternativas Portugal Lda	Zona Industrial da Feiteirinha Lote 1	Rogil
Finamo - Edificações, Lda .	Zona Industrial Casalinhos de Alfaiata	Casalinhos de Alfaiata
Floset Instalações Eléctricas e Hidraulicas, Lda	R. Mário Valença, 66	Nogueira

Fluxoterm Lda.	Rua Ucha Armz	Cova Alta - Santa Catarina da Serra
Francisco António Ferreira & Herdeiros, Lda. Casa Ferreira	Rua de Santo António, nº 131 - Apartado 196	Faro
FUSICABO - Montagens Eléctricas, Lda .	Rua Maria Fogaça, Lt. 6, 17	Pombal
Futursolutions Sistemas Eléctricos e Domótica, Lda	Av. Prof. Vieira Natividade, Lt 5, 74B	Alcobaça
Gasfomento, S.A. Sistemas e Instalações de Gás	Av. Infante D. Henrique, nº328-2ºdto.	Lisboa
GERACAO SOLAR SOLUCOES INTEGRADAS DE ENERGIA LDA	R MAJOR LUIS DE MOURA ARMAZEM B	FAMÕES
Ges Siensa Portugal, S. A.	R. do Mercúrio, Lt 33	Pinhal Novo
Gigabeira Instalações Especiais, Lda.	Qta Chandeirinha, Apartado 59	Belmonte
Globoutsourcing Serviços Globais, Lda	Rua Álvaro Ferreira Alves, 25	Santa Marta do Pinhal
GMLUX - Electricidade, Lda Costa	Rua Armindo Costa Azevedo Junior - Loja 54	S. Martinho Bougado
Grupo SINERGIAE Giravento - Energias Renováveis, Lda	Rua Pedro Hispano nº12	COIMBRA
GSMK - GESTÃO ENERGIA S.A.	Pq. Industrial Lagoazente	Barra
Guedes Fernandes Construções Técnicas Lda	Largo dos padrões bloco 1 loja 2	Cortes
Guiatel S.A. Serviços de Telecomunicações	EN13 Centro Empresarial de Vilar do Pinheiro, nº 355	Vilar do Pinheiro
GUIMAELECTRA INSTALAÇÕES ELECTRICAS, LDA	RUA DA BOAVITA, 680	PONTE
Guri Electricidade, Lda	Outeiro	Ruivães
Habiclíma-Engenharia e Ins. Téc. Lda. Habiclíma	av. Heróis do Ultramar, 67	Pombal
HIE, Lda. Energias Renováveis	Rua da Bélgica Lote 12A- 4ºDtº	Carcavelos
Himalaya-Sol, Lda n/a	Rua Luís de Camões, 632	Arneiro
HJP Instalações Eléctricas, Lda	Rua 25 de Novembro nº 625	Ribeira de Baixo
HLC - Engenharia e Gestão de Projecto HLC, SA	R Central Park, 2, piso 4 A	Linda-à-Velha
Homar - Instalações Técnicas em Edifícios, Lda	Catarruchos	Arazede
Home Energy II SA .	ZN IND Oliveira de Frades	Oliveira de Frades
Humberto Pimentel Esteves & Filhos Lda	Igreja Nova - Apartado 3	Aljezur
Iberfer Equipamentos e Construções Técnicas, S. A	Lugar de Adiça	Dardavaz
IBERINSTAL - Instalações Técnicas Lda .	Largo Filinto Elísio 2C	Cova da Piedade
IEN - INSTALAÇÕES ELEC. DO NORTE, LDA IEN	Largo Manuel Couto Viana, Lt. 7 - Cave	Vaian do Castelo
IJC - Instalações Eléctricas, Lda IJC	1º Complexo Industrial, Edifício C3, Granja	Vialonga
Induprotec, Lda Induprotec, Lda	Rua Prof. António R. Garcia de Vasconcelos, nº9, 2ºEsqº	Oliveira do Hospital
Instaladora Central de Alfornelos, Lda ICA	Praceta Gomes Leal nº 3 - B	Alfornelos
INSTALCELOS Inst. Eléct. e Obras Públicas, Lda	Lugar do Paranho - Remelhe	Barcelos
Instalcentro, Lda Instalcentro, Lda	Rua Tenente Coronel Joaquim Duarte Alves nº76	Carvide
INSTALGEL LDA	VOLTA DA TOCHA	ARAZEDE
Instalojovi Instal. Eléctricas, Lda	Beco Romana da Luz nº 1	Casal da Pôpa
Intelsol II, Lda	Loreto - Arco da Calheta	Loreto
IRMÃOS FREITAS ELECTRICISTA, LDA	Rua Monte de Aldão, 1219	Guimarães
IRMÃOS HELENO, LDA. IRMÃOS HELENO, LDA.	TRAVESSA DA RUA DO VISO, Nº. 2 CAVE ESQUERDA	FIGUEIRA DA FOZ
ITANCEL-Mont.Ind.,Rep.e Comercializ. Limitada	Rua Moreira Cardoso,1-r/c esq.	Amadora
Iteag Instalações Eléctricas Especiais, Lda	Rua dos Corticeiros, Lote 19	Qta dos Machados
J. A. Ramos, Lda _	Zona Industrial, lotes 109, 110 e 111	Vila Viçosa
J. Carlos Pereira, Lda Pereira	Qta da Galhosa	Santana
J. da Silva Faria,Lda J. da Silva Faria, Lda	Zona Industrial da Varziela, Rua 3	Mindelo
J. Fonseca & Filho, Lda Fonseca	Rua da Vidigueira, 36	Loureiro

Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia

J. J. COSTA ALVES - SOC. INSTAL. Lda .	R. DO TERREIRO	Lixa
J. M. Sousa S. A.	Pq de Empresas 4 Marcos, Alto da Malhada	Alhos Vedros
J.F.Vilhena, Material Electrico LDA	Zona Industrial Ugeira, Lt. 24	Santiago do Cacém
Jayme da Costa Mecânica e Electricidade, S. A	Rua de Murracezes, 216	Grijó
JDES, LDA JDES, LDA	AV. DAS DESCOBERTAS LT 29 LOJA	CARREGADO
JG Intalações Eléctricas,Lda	Zona Industrial das cantarias, rua arq Viana de Lima,Lt 170	Bragança
JMFM Gab. de Projectos de Engº, Lda	Rua Bernardo Santareno, nº 1 - Cv	Beja
JOAO CERQUEIRA PEREIRA, LDA JCP	AGRELOS, LOJA Nº7	PONTE DA BARCA
JOÃO JACINTO TOMÉ, S.A. JYTOMÉ	RUA POSSIDÓNIO DA SILVA, 158-A	CAMPO DE OURIQUE
JOÃO SALVADOR LDA JOÃO SALVADOR	RUA DOS ARCOS 67-A	TOMAR
João Santos & Coelho, Lda JSC	Zona Industrial de Taboeira	Esgueira
Joaquim & Fernandes, Electricidade e Telecomunicações, Lda	EN 125 Bias do Norte	Olhão
Joaquim Amorim Gomes & Filhos, Lda	Rua Padre Lé	Gafanha da Encarnação
JOAQUIM DA SILVA MARQUES-VRIAE, LDA	RUA DO SAPUGAL, 817	FRADELOS
JOAQUIM MANUEL SANTOS CARREGA CAPINHA	RUA S MIGUEL RB PERDIZES	CASTELO BRANCO
Jorge Manuel & Silva Lda. Jomasil	Rua Nova Do Corujo Pavilhão G	Vila Boa- Barcelos
JORGE SILVA MELO, LDA MELO	RUA VALA DA CANA Nº 1	FROSSOS
José Armando Instalações Eléctricas, Lda	Rua D. Dinis Bordalo Pinheiro nº575	Ribeira da Penha Longa - Alcabideche
José Carlos Simão Mendonça	Rua da Ponte nº 5	PINHAL - ÓBIDOS
JOSÉ FERNANDO MIRANDA DA COSTA, LDA FERTÉCNICA	RUA DO SOUTO, N.º 170	BARROSELAS
José Francisco da Conceição	Bairro de Montalvão, Rua 3. 13	Castelo Branco
José M. Oliveira, Unipessoal Lda Oliveira	Rua dos Anjos 10 RC, 6300-513 Guarda	Guarda
JOSÉ REIS, LDA ESEC	RUA SENHORA DA MESTRA, 118	SERZEDO
José Ventura & Rodrigues, Lda. José Ventura & Rodrigues, Lda.	Rua António Aleixo, nº28, 1ºesq	Sines
Julio & Duarte Lda	Parada do Alto de S. João nº11 C/v direita	Lisboa
Just4Sun,Lda Energias Renovaveis	Urb Vale Amoreiras,Lote 11 3ºftr	Faro
Juvenal Alves Domingos, Idal Alves Domingos	Rua dos Bombeiros Voluntários, 12-14	Figueiró dos Vinhos
LAPERLUZ INSTALAÇÕES ELECTRICAS LDA.	R. JOAQUIM MAIA IGREJA, 55	TOUGUINHA
Laurentino & Filhos, Lda	Rua da Escola, 28	Casal do Amaro
LCPower - Soluções de Energia, S.A. .	Via Carlos Mota Pinto nº 466, Sector IV	Zona Industrial I - Moreira da Maia
Leirivolt, Lda .	Rua Vale da Arelira, Lote nº4	Barosa
Leonel Barbeiro Electricidade e Canalizações, Lda	Rua Nova nº 196	Serra Porto d'Urso
LGB Lda Soc. Projectos e Infraest Eléct. Tel	Rua Padre Cruz - Bº Srª da Fresta	Trancoso
Linkuti, Domótica e Multimédia , Lda	Rua do Cedro, 32 - 1º Esq	COIMBRA
Lobosolar Energias Renováveis Lda	Zn Ind de Almeirim, Rua B - 11 - Ap 332	Évora
LUFTEC - Técnicas Eléctricas, Lda Luís Antunes	Av. Angola, nº54	Lourinhã
LUMINAL FERNANDO DA SILVA GONÇALVES, LDA	RUA SANTO ANTONIO, N.º 90	VILA NOVA DE FAMALICÃO
Lusovolt S.A Electricidade	Estrada das Vilas 12b Mafra	Mafra
Luxventil Energie Unip. Lda Renovaveis, climatização e AVAC	Rua José Pereira de Lima nº123	Rio Galinhas
M.AZEVEDO, LDA Gás e Climatização	Rua Elias Garcia 145	Ermesinde
Manuel Rodrigues Fernandes	Rua Dr. Manuel Pereira de Melo, Bloco 1, Arma. Q	Sobral
manuel leão sanches riscado lda riscado	estrada montalvão nº 73 r/c esq	castelo branco
ManuHelp Unipessoal Lda	Rua da Cavada nº 22 R/C Esq.	Leiria

Marques, Marques e Pereira Lda	Rua Bacelo Grande nº1	Tojal
MATEACE ELECTRICIDADE, S.A.	Rua Padre Manuel Bernardes, 85	Padrão da Légua
Matelvis - Instalações Seg. Tele. Lda Matelvis Lda	Bairro da Portela	Paradinha
MATIAS PERPETUO CESAR-CONSTRUÇÕES LDA construcoes lda	R BRANQUINHO FONSECA 21 SUB SUB CV B	AMADORA
MEC Mont. Eléctricas Construção Lda. MEC Lda.	Rua Projectada à Rua Pedro Nunes	Loulé
Melnor Montagens Eléctricas Unip. Lda Melnor	Rua de Pitancinhos	Palmeira
MEPRITE Proj. e Inst. Tec. Esp. Lda	Centro Empresas Vilamoura, LT-34, BL-A, Frac E/F	Vilamoura
Millot - Empresa Geral Electric., Lda Millot	Rua do Bairro Social, n.º67 Armazém F	Esmoriz
Montagens Eléctricas Fareense Lda MEF	Sítio dos Quartos	S. Clemente Loulé
Montel Montagens Eléctricas, Lda	Apartado 34	PEDROSO
Moreme Montagens, Reparações e Manutenção Electromecânicas, Lda.	Trv. S. Paulo, Lt 117	Casal de Cambra
Mota-Engil, Engenharia e Construção, S. A	Casa da Calçada	Amarante
Movitrom - Sistemas de Energia Lda. ---	Centro Empresarial Sintra-Estoril 3, Armazem B.	Linhó
MPMAIS.I Sist. Contr. e Inst. Elect MPI	Rua das Devesas 110	Alfena
MPS -electricidade	Rua Pedro Nunes, Lote 38 Armazém J Apartado 66	Caldas da Rainha
Multicalor - Energias Renováveis, S.A.	Rua da Indústria, nº 290	Zona Industrial de Pindelo
N. D. G. - Elect. e Seg. Unip. Lda. Gomes	Rua Casal do Sobreiro Lote 34 1º	Brejos de Azeitão
Net Plan Telecomunicações e Energia, Lda.	R. Hermano Neves, 22, 2º A	Lisboa
Norgrupo Comercial - Com.Rep.Assist. Imp. Exp. de Bens e Sserviços, Lda.	Av. da República, 872 - 7º Sala 7.1.	Vila Nova de Gaia
NOVIRMANSIL, IDA SILVA	NABAIS - ESCARIZ	ESCARIZ
Nunes & Arnauth, Lda Arnauth	Serrada do Penedo	Pedrógão Pequeno
NUNES & NUNES Lda.	PARQUE INDUSTRIAL DA SERTÃO LOTE 18	SERTÃO
OBRIVOLT Soc. Const. e Inst. Eléctricas. Lda	Estrada dos Paços	Fazendas de Almeirim
OFICINA ABERTA Montagens, Manutenção Industrial, Lda	Parque Rolear - Sítio do Areal Gordo	Faro
Olhelectro Instalações Eléctricas, Lda	Zona Industrial de Olhão, Lote 187	Olhão
OMNINSTAL, S.A. GRUPO ELECENOR	Consiglieri Park - Estrada Consiglieri Pedroso, 71 - Edifício E - R/C Esq.	Barcarena
P. T. E. Engenharia. Telecomunicações, Electricidade Controle, Lda.	Pq de Empresas 4 Marcos, Alto da Malhada	Alhos Vedros
P.E.E.I.E., Lda PEEIE	AVENIDA TENENTE VALADIM - QTA DO NICO	CHAVES
Painhas SA	Zona Industrial, 2ª fase, lote 11	São Romão do Neiva
Pascoal Luz e Som Lda pascoal	R Comercio 100	Viseu
PATRIPLAN -- ENERGIAS RENOVÁVEIS Lda.	AZINHAGA CSL MASCOTE CIMA N38V	QUINTAS
Paulo Barradas & Goreti Sistemas Eléctricos e Alarmes Lda	Quinta do Calvário LT2 LJ1	Chaves
PBG-TECNITROM ENERGIA E TELECOMUNICAÇÕES, SA	ESTRADA NACIONAL 252, APARTADO 84	Parque Industrial das Carrascas
Pedro Moreira & Companhia, Lda	Lugar Foz de Cima	Lousada
Pinto & Bentes, S. A.	Av. Almirante Gago Coutinho, Nº 161	Mem Martins
Piscinas em Pedra, Lda. Piscinas em Pedra, Lda.	Urbanização Industrial da Marateca, Lote nº 4	Lagos
Polisol - Electricidade e E. Solar Ld Polisol	Av. O Seculo nº 21	Samora Correia
Poluic, Lda Poluic	Rua Joaquim Nicolau de Almeida, 826 - 2º	Vila Nova de Gaia
PORPOWER, LDA	Rua José Maria Pedroto, 107, Ap. 41	Moreira
PREDIBAND - Predial Bandeiras, Lda. Lda.	Zona Industrial da Pedrulha, Lote 12	MEALHADA
PRISMAVE Construção de Equipamentos Eléctricos, Lda	Quinta do Simão - Esgueira	Aveiro
Qbeiras Energia Lda	Praça do Município, Ed. Multiserviços S9	Nelas
Qualinstal Instalações Técnicas Eléctricas, Lda	Rua Camilo Castelo Branco nº 983 esc. 11 - Santa Marinha	Vila Nova de Gaia

Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia

QUIMAR ENERGY MICROGERAÇÃO DE ENERGIAS, SA	AV. ENG. DUARTE PACHECO, TR 2, PISO 11, SL 10	LISBOA
Raiocoop - Elec., Telec e C. Civil, CRL	Quinta do Mirante - Lote C10, 144 Loja	Pendão - Queluz
Rampasolar Energias Renováveis, Lda	Lugar da Ramôa, Lote C3	Merelim (S. Pedro)
Raposo & João Gomes, S.A. Raposo & João Gomes, S.A.	Rua do Souto, 273 - Apartado 253	Árvore
RBN Electrotécnica, Lda. Instalações Eléctricas e Hidráulicas	Tv. das Recolhidas, 14 C	LISBOA
REFRISUN, LDA Refrigeração e Energias Renováveis	EN 125 - Fonte de Boliquireme, 93	Fonte de Boliquireme
RELEVE RECURSOS ENERGÉTICOS, LDA.	ESTRADA DA PENHA, QUINTA DAS FLORES - APARTADO 4008	FARO
Reneco Lda	AI MINHO, BIC MINHO, CAMPO SRA. D'AGONIA	VIANA DO CASTELO
Renovadora Electromecânica da Glória Lda	Rua da Glória nº20-20A	Lisboa
Revez-Solar Energias Renováveis, Lda Revez-Solar, Lda.	Rua da Agricultura, 2 Parque Industrial	BEJA
Right Now, Lda. Engenharia, Instalação e Manutenção	Núcleo Empresarial da Venda do Pinheiro, Rua C, Pav. 62	Venda do Pinheiro
Rogério Farinha & Almeida Unipessoal, Lda	Praceta José Maria Bomtempo, Lote 9 Zona 6, Loja Esq	Colinas do Cruzeiro
ROLEAR Automatização, Estudos e Representações, S.A.	Parque Rolear - Sítio do Areal Gordo - Apartado 530	Faro
Rui Eduardo Pelica Fialho	Rua dos Espingardeiros, 23A	MOURA
S.T.M.I Engenharia de manutenção Lda	Estrada de manique, 1232 armazem 10	Alcoitão
Santos & Sousa, Lda	Rua Álvaro Pires De Miranda Nº 107 Sub/CV	Leiria
Satvez Remodelações Electricas Gerais Lda Satvea Lda	Urbanização de Faquelo nº 4	Arcos de Valdevez
SEGMA Serviço de Eng. Gestão e Manutenção	Rua Francisco Pereira Ataíde n.º1	Ponta Delgada
SELF ENERGY SERVIÇOS DE ENERGIA, SA	Estrada de Talaíde, Lote 27	Talaíde
SENGINOR LDA SENGINOR	AV. PADRE MANUEL COSTA REGO 926	VALE SÃO MARTINHO
Sernis Sernis	Quinta do Carreiro Lote 9	Frossos
SICAPREP (Madeira), Lda. SICAPREP (Madeira), Lda.	Rampa Pico do Cardo, nº. 8 - Entrada 1	Santo António
SICATEL, unipessoal, Lda Sist. Int. Traf. Tel e Ele.	Rua das Figueiras, n.º9 C/V D.ta (loja)	Rinchoa
SIEME III INSTALAÇÕES ESPECIAIS, LDA	Trav. da Rua Castelões Sul, 96	Fajozes
SILMALUX Montagens Electricas, Lda	Quinta da Marvila, lote 16A	BRAGA
SIMOCIMA instalações electricas Lda	rua hironidino guerra nº36 - brejo	carvide
Sinalarte, Lda Sinalarte	Zona Industrial de Oia lote C 25	Oliveira do Bairro
Sinergetica Lda Projectos e instalações	Rua da Pragosa, nº 158	Pragosa
Sintra 2001, Consult. e Proj. Eng.Lda Sintra 2001	R.Camara Pestana, Edif.Sintra, Lj 12	Sintra
Soares & Soares, Lda. 3Solar	Av, Francois Mitterrand, Nº 33 Garagem	Ranholas
Socalor Sistemas de Climatização	Rua da Feira 1	Elvas
Socorreias, Lda. Socorreias, Lda.	Rua do Colégio Lote 2	Oliveira do Hospital
SOLAR 3G ENERGIAS RENOVAVEIS LDA	AV SABOIA 486 2 C	MONTE ESTORIL
SOLAR PROJECT S A	Rua dos Terços, 623	Canelas
SOLARWATERS, LDA	Rua Quinta das Lavadeiras, 31 6º Esq	Lisboa
SOLVENAG UNIPESSOAL, LDA	Rua do Cubo nº50	Balazar
Somagil Electricidade, Lda	Rua Fontainhas	Andrinos
Somitel Energia, SA Somitel Energia, SA	Zona Industrial de Oliveirinha, Lote A - Apartado 70	Oliveirinha
SONACO Sociedade Nacional de Construções Lda	Av. D. Afonso Henriques, nº 528 - 2º	Matosinhos
SOTECNEL - Soc. Técnica de Electricid Idª	Rua da Constituição, 1368	Porto
SOTECNISOL, S.A.	RUA FERRO - FETAIS	CAMARATE
Sousa Pedro Projectos e Gestão de Instalações Técnicas, S. A	Rua Terra das Vinhas	Qta de Pisões
SPLB - Comer. e Inst. Eléctricas, Lda SPLB, Lda	Rua da Cal, 129 A	Custoias

SUNWAVE, LDA. José Luís Correia	L. CARVALHOS, 1	SANDE
T&T Multielétrica, Lda	Crasto de Campia	CRASTO
Tecniserpa-Tecnica de Instalações Electricas de Serpa, Lda Tecniserpa, Lda	Alameda Abade Correia da Serra nº12	Serpa
Tecnoalmonda Lda Equipamento Electrotécnico do Almonda	Rua Dr Jose Marques Lote 9 R/c	Torres Novas
TecnoSoares, Lda TecnoSoares, Lda	Rua José Gil nº 8	Figueira de Castelo Rodrigo
TEGAEL Telecomunicações, Gás e electricidade, SA	Zona Industrial do Monte da Barca, Lote 22, apartado 85	coruche
Telcabo Telecomunicações e Electricidade, Lda	Apartado 14	Alenquer
Telenorte e Vez-Empreiteiro de Obras Publicas e Telecomunicações, Lda	Pct. Artur Bivar, 48	Arcos de Valdevez
TELIC SA TELIC SA	R Prof reinaldo Santos,42	LISBOA
Topoluz Instalações Eléctricas	Estrada Avelino Pinto, Vilas Ocean View casa E	Madeira
Tripolar Electricidade e Telecomunicações,SA	Rua de St. André nº210	Parque Industrial de Adaúfe
TURBINFRA - ENG. CONSTR. CIVIL, LDA TURBINFRA	Estrada da Paiã, lote 5 - Casal dos Moinhos	Pontinha
Ultratest, Unipessoal, Lda. Electricidade e Telecomunicações	EN 125, Edificio Via Mourisca, lote C, 1º frente	Olhão
Utilisol, Lda.	TAGUS PARK - NUCLEO CENTRAL, N.º 378	PORTO SALVO
VALACABO Valas e Inst. de Cabos Eléctricos Lda	Rua Estrada Real, 134	Vale de Santarém
Valinox-Industrias Metalurgicas, S. A Valinox	Zona industrial da Farrapa	Chave
VEIA C.O.P.MAT. ELECTRICO LDA VEIA LDA	TRAVESSA CARLOS BACELAR ED. EUROPA CAVE Nº 62	VILA NOVA DE FAMALICÃO
Velroc Lda	Rua Gonçalves Zarco, 1129 B, escritório 113/115	Leça da Palmeira
VENSOL Energias renovaveis Ida	Estrada Nacional 378	Fernão Ferro
VILGEFCON, LDA Gest. Fisc. Man. de Instal. Especiais	Rua Dr. Manuel Gomes da Silva, 22 r/c	Cartaxo
Vimasol - Energias Renováveis, Lda	Rua Casal doe Ledoso, 226	Selho S. Jorge
VIMSEC, Lda Serviços, canaliz. e electricidade	Urb. Quinta do Amparo, Lote 22, Loja D	Portimão
Visabeira Sociedade Técnica de Obras e Projectos, Lda	R. Grão Vasco, 10 - 1	Viseu
VISMEC Instalações Electromecânicas - Lda	Parque Industrial de Coimbrões, 38	Viseu
Visotela Sociedade Técnica de Electromecânica, Lda	Pq Industrial de Coimbrões, Lt 49/50	S. João de Lourosa
Voltec, Lda Voltec	Ria Guerra de Abreu, 8	Esgueira
Woodsol - Energias Alternativas;Lda Woodsol	Estrada Alternativa Caniço Edif.Monte Azenha II Loja B	Caniço
ZANE INTERNACIONAL, LDA	Rua Engº Duarte Pacheco, 151	Vila Moreira

Tabela 9: Entidades Instaladoras registadas

12.2 DECRETO-LEI Nº363/2007

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DA INOVAÇÃO

Decreto-Lei n.º 363/2007

de 2 de Novembro

O Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de Março, veio estabelecer as bases gerais de organização e funcionamento do Sistema Eléctrico Nacional (SEN), classificando a produção de electricidade em regime ordinário e em regime especial. Ao regime especial corresponde a produção de electricidade com incentivos à utilização de recursos endógenos e renováveis ou a produção combinada de calor e electricidade.

Independentemente da revisão dos regimes aplicáveis às energias renováveis e à co-geração, entendeu o Governo avançar, desde já, com um regime simplificado aplicável à microprodução de electricidade, também designado por renováveis na hora conforme previsto no Programa de Simplificação Administrativa e Legislativa SIMPLEX 2007.

A microprodução de electricidade, como actividade de produção de electricidade em baixa tensão com possibilidade de entrega de energia à rede eléctrica pública, foi regulada pelo Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março. O presente decreto-lei prevê que a electricidade produzida se destine predominantemente a consumo próprio, sendo o excedente passível de ser entregue a terceiros ou à rede pública, com o limite de 150 kW de potência no caso de a entrega ser efectuada à rede pública.

Passados que são mais de cinco anos desde a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março, verifica-se que o número de sistemas de microgeração de electricidade licenciados e a funcionar ao abrigo deste enquadramento legal não atingiu uma expressão significativa.

Por outro lado, o Decreto-Lei n.º 312/2001, de 10 de Dezembro, estabeleceu as disposições aplicáveis à gestão da capacidade de recepção de electricidade nas redes do Sistema Eléctrico de Serviço Público (SEP), por forma a permitir a recepção e a entrega de electricidade proveniente de novos centros electroprodutores do Sistema Eléctrico Independente (SEI). Contudo, esse decreto-lei aplica-se a todos os centros electroprodutores, independentemente da sua potência nominal ou localização geográfica, conduzindo, assim, a uma excessiva centralização administrativa dos processos de licenciamento de micro ou pequena ou microdimensão.

Assim, desta forma, o presente decreto-lei vem simplificar significativamente o regime de licenciamento existente, substituindo-o por um regime de simples registo, sujeito a inspecção de conformidade técnica. A entrega e a análise de projecto são substituídas pela criação de uma base de dados de elementos-tipo preexistente que o produtor deve respeitar, encurtando-se um procedimento com duração de vários meses a um simples registo electrónico.

É criado o Sistema de Registo da Microprodução (SRM), que constitui uma plataforma electrónica de interacção com os produtores, no qual todo o relacionamento com a Administração, necessário para exercer a actividade de microprodutor, poderá ser realizado.

É ainda previsto um regime simplificado de facturação e de relacionamento comercial, evitando-se a emissão de facturas e acertos de IVA pelos particulares, que, para esse efeito, são substituídos pelos comercializadores. O microprodutor recebe ou paga através de uma única transacção, pelo valor líquido dos recebimentos relativos à electricidade produzida e dos pagamentos relativos à electricidade consumida.

O presente decreto-lei cria, também, dois regimes de remuneração: o regime geral e o bonificado. O primeiro para a generalidade das instalações e o segundo apenas aplicável às fontes renováveis de energia, cujo acesso é condicionado à existência no local de consumo de colectores solares térmicos, no caso de produtores individuais, e da realização de auditoria energética e respectivas medidas, no caso de condomínios. O incentivo associado à venda de electricidade é, assim, utilizado para promover a água quente solar, complementando o Decreto-Lei n.º 80/2006, de 21 de Abril, que estabelece a obrigatoriedade de instalação destes sistemas nos novos edifícios.

Este decreto-lei vem dar expressão a duas das medidas contempladas na Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de Outubro, que aprova a Estratégia Nacional para a Energia, no que respeita às linhas de orientação política sobre renováveis e eficiência energética.

Foram ouvidos os órgãos de governo próprio das Regiões Autónomas, a Associação Nacional de Municípios Portugueses e as associações de consumidores.

Foi promovida a audição do Conselho Nacional do Consumo.

Foram ouvidos, a título facultativo, a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos e a Associação do Sector das Energias Renováveis.

Assim:

Nos termos da alínea a) do n.º 1 do artigo 198.º da Constituição, o Governo decreta o seguinte:

CAPÍTULO I

Disposições gerais

Artigo 1.º

Objecto

O presente decreto-lei estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, adiante designadas por unidades de microprodução.

Artigo 2.º

Siglas e definições

Para efeitos do presente decreto-lei, são utilizadas as seguintes siglas e definições:

- a) «Comercializador» a entidade titular da licença de comercialização de electricidade;
- b) «Comercializador de último recurso» a entidade titular de licença de comercialização de electricidade sujeita a obrigações de serviço universal;
- c) «DGEG» a Direcção-Geral de Energia e Geologia;
- d) «DRE» a direcção regional de economia competente;
- e) «Potência contratada» o limite da potência estabelecida no dispositivo controlador da potência de consumo;
- f) «Potência instalada» a potência, em quilowatt, dos equipamentos de produção de electricidade;
- g) «Potência de ligação» a potência máxima, em quilowatt, que o produtor pode injectar na Rede Eléctrica de Serviço Público (RESP), que no caso de instalações com inversor é equivalente à potência instalada máxima deste equipamento;
- h) «Ponto de ligação» o ponto que liga a unidade de microprodução à RESP;
- i) «Produtor» a entidade que produz electricidade por

2 — A unidade de microprodução deve ser integrada no local da instalação eléctrica de utilização.

3 — Os produtores de electricidade nos termos do presente decreto-lei não podem injectar na RESP, no âmbito desta actividade, uma potência superior a 50 % da potência contratada para a instalação eléctrica de utilização.

4 — O limite estabelecido no número anterior não é aplicável às instalações eléctricas de utilização em nome de condomínios.

5 — O acesso à actividade de microprodução é sujeito a registo no SRM nos termos do artigo 13.º

6 — O acesso à actividade de microprodução pode ser restringido mediante comunicação pelo operador da rede de distribuição, nos casos em que a instalação de utilização esteja ligada a um posto de transformação cujo somatório da potência dos registos aí ligados ultrapasse o limite de 25 % da potência do respectivo posto de transformação.

7 — A restrição prevista no número anterior é aplicável apenas aos pedidos de registo recebidos pelo SRM após cinco dias úteis da comunicação pelo operador da rede de distribuição ao SRM das instalações eléctricas de utilização abrangidas.

Artigo 5.º

Direitos do produtor

No âmbito do exercício da actividade de produção de electricidade, o produtor tem o direito de:

- a) Estabelecer uma unidade de microprodução por cada instalação eléctrica de utilização;
- b) Ligar a unidade de microprodução à RESP, após a emissão do certificado de exploração e celebração do respectivo contrato de compra e venda de electricidade, nos termos do artigo 19.º;
- c) Vender a totalidade da electricidade produzida pela potência permitida nos termos do artigo 4.º, líquida dos serviços auxiliares.

Artigo 6.º

- intermédio de uma unidade de microprodução;
- j) «RESP» a Rede Eléctrica de Serviço Público;
- l) «SRM» o Sistema de Registo de Microprodução, que constitui uma plataforma electrónica de interacção entre a Administração Pública e os produtores;
- m) «Unidades do grupo 1» a instalação de produção de electricidade monofásica em baixa tensão com potência de ligação até 5,75 kW.

Artigo 3.º

Âmbito

O presente decreto-lei aplica-se às unidades de grupo 1, quer utilizem recursos renováveis como energia primária quer produzam, combinadamente, electricidade e calor.

Artigo 4.º

Acesso à actividade de produção

1 — Podem ser produtores de electricidade por intermédio de unidades de microprodução todas as entidades que disponham de um contrato de compra de electricidade em baixa tensão.

Deveres do produtor

Sem prejuízo do cumprimento da legislação e regulamentação aplicáveis, o produtor deve:

- a) Entregar a electricidade em conformidade com as normas técnicas aplicáveis e de modo a não causar perturbação no normal funcionamento da rede pública de distribuição em baixa tensão (BT);
- b) Produzir electricidade apenas a partir da fonte de energia registada nos termos do presente decreto-lei;
- c) Consumir o calor produzido no caso de equipamentos de produção combinada de electricidade e de calor;
- d) Celebrar um contrato de compra e venda de electricidade, nos termos do artigo 19.º;
- e) Prestar à DGEG, ou a entidade com competências delegadas por esta, à DRE territorialmente competente, ao comercializador ou ao comercializador de último recurso, consoante o caso, e ao operador da rede de distribuição todas as informações que lhe sejam solicitadas;
- f) Permitir e facilitar o acesso do pessoal técnico da DGEG, ou da entidade com competências delegadas por esta, da DRE territorialmente competente, do comercializador ou do comercializador de último recurso, consoante o caso, e do operador da rede de distribuição à unidade de microprodução, no âmbito das suas competências, para efeitos do presente decreto-lei;
- g) Suportar os custos da ligação à RESP, nos termos do Regulamento de Relações Comerciais, incluindo o respectivo contador de venda;
- h) No caso de instalações que utilizem a energia eólica, ou que estejam localizadas em locais de livre acesso ao público, possuir um seguro de responsabilidade civil, nos termos a definir mediante portaria conjunta dos membros do Governo responsáveis pelas áreas das finanças e da economia.

Artigo 7.º

Competências da DGEG

1 — Compete à DGEG a coordenação do processo de gestão da microprodução, nomeadamente:

a) Criar, manter e gerir o SRM destinado ao registo das unidades de microprodução, com informação do respectivo titular e instalador, assim como das inspecções necessárias à emissão do certificado de exploração;

b) Realizar as inspecções necessárias à emissão do certificado de exploração, directamente ou através de técnicos contratados para o efeito;

c) Emitir o certificado de exploração da instalação de microprodução;

d) Criar e manter uma base de dados de elementos-tipo, que integrem os equipamentos para as diversas soluções de unidades de microprodução;

e) Manter a lista das entidades instaladoras devidamente actualizada;

f) Constituir uma bolsa de equipamentos certificados, mantendo uma lista actualizada no sítio da Internet da DGEG ou da entidade com competências delegadas por esta;

g) Regulamentar os procedimentos aplicáveis à implementação da microprodução, definindo, designadamente, tipos de relatórios e formulários que devam ser preenchidos e apresentados em formato electrónico no sítio da Internet da DGEG, ou da entidade com competências delegadas por esta;

h) Fornecer aos interessados e divulgar no sítio da Internet da DGEG, ou da entidade com competências InCI, Instituto da Construção e do Imobiliário, I. P., para a execução de instalações de produção de electricidade.

2 — Todas as entidades instaladoras, empresários em nome individual ou sociedades comerciais, que pretendam exercer a actividade de instalação de unidades de microprodução, devem proceder ao seu registo no SRM, mediante o preenchimento de formulário electrónico a aprovar por despacho do director-geral de Energia e Geologia disponibilizado no sítio da Internet da DGEG ou da entidade com competências delegadas por esta.

3 — O registo das entidades instaladoras é válido por um período de três anos, findo o qual caduca automaticamente, salvo se estas procederem, antecipadamente, a novo registo.

4 — Cada entidade instaladora deve dispor de um técnico responsável por instalações eléctricas de serviço particular, nos termos do Decreto Regulamentar n.º 31/83, de 18 de Abril.

CAPÍTULO II

Remuneração e facturação

Artigo 9.º

Regimes remuneratórios

1 — Os produtores têm acesso a dois regimes remuneratórios:

a) Regime geral, aplicável a todos os que tenham acesso à actividade, nos termos do artigo 4.º;

b) Regime bonificado, para unidades de microprodução

delegadas por esta, informação relativamente às diversas soluções de produção de electricidade e de aquecimento, designadamente as suas vantagens e inconvenientes;

i) Realizar campanhas de sensibilização para as soluções de água quente solar e outras equivalentes renováveis ou de elevada eficiência.

2 — O director-geral da DGEG pode delegar as competências previstas nas alíneas a) a f) do número anterior em entidade legalmente constituída e reconhecida para aprovar projectos e inspecionar e certificar instalações eléctricas, pelo prazo de quatro anos renováveis, nos termos de protocolo a celebrar entre estas entidades e homologado pelo membro do Governo responsável pela área da economia.

3 — O director-geral de Energia e Geologia pode aprovar, mediante despacho publicado no *Diário da República*, regras técnicas específicas para as instalações de microprodução que se justifiquem para o adequado funcionamento do sistema.

Artigo 8.º

Actividade de instalação

1 — Podem exercer a actividade de instalação de unidades de microprodução empresários em nome individual ou sociedades comerciais, com alvará ou título de registo no

com potência de ligação até 3,68 kW que utilizem as fontes de energia previstas no n.º 5 do artigo 11.º, aplicável nas seguintes condições:

i) No caso das entidades que pretendam instalar unidades de cogeração a biomassa, desde que esta esteja integrada no aquecimento do edifício;

ii) No caso das entidades que pretendam instalar unidades de microprodução que utilizem outras fontes de energia, diferentes da prevista na subalínea anterior, desde que estas disponham de colectores solares térmicos para aquecimento de água na instalação de consumo, com um mínimo de 2 m² de área de collector;

iii) No caso dos condomínios, desde que estes realizem uma auditoria energética ao edifício e que tenham implementado as medidas de eficiência energética identificadas nesta auditoria com período de retorno até dois anos.

2 — O acesso ao regime bonificado é realizado mediante solicitação do promotor no formulário do registo previsto no n.º 1 do artigo 13.º e verificação do cumprimento das condições previstas no número anterior no acto da inspecção, nos termos do artigo 14.º

3 — No âmbito do presente decreto-lei apenas é remunerada a energia activa entregue à RESP.

Artigo 10.º

Regime geral

1 — Todos os produtores que não obtenham acesso ao regime bonificado são considerados no regime geral.

2 — A tarifa de venda de electricidade é igual ao custo da energia do tarifário aplicável pelo comercializador de

último recurso do fornecimento à instalação de consumo.

Artigo 11.º

Regime bonificado

1 — Para cada produtor no regime bonificado é definida uma tarifa única de referência aplicável à energia produzida no ano da instalação e nos cinco anos civis seguintes.

2 — A tarifa única de referência aplicável a cada produtor nos termos do número anterior é a seguinte:

a) Aos primeiros 10 MW de potência de ligação registados a nível nacional, a tarifa de referência é de € 650/MWh;

b) Por cada 10 MW adicionais de potência de ligação registada a nível nacional, a tarifa única aplicável é sucessivamente reduzida de 5 %.

3 — Após o período de 5 anos previsto no n.º 1 e durante o período adicional de 10 anos, aplica-se à instalação de microprodução, anualmente, a tarifa única correspondente à que seja aplicável, no dia 1 de Janeiro desse ano, às novas instalações que sejam equivalentes.

4 — Após o período previsto no número anterior, aplica-se à instalação de microprodução o regime geral previsto no artigo anterior.

5 — O tarifário de referência previsto no n.º 2 depende do tipo de energia renovável utilizada, mediante a aplicação das seguintes percentagens à tarifa de referência:

a) Solar — 100 %;

b) Eólica — 70 %;

c) Hídrica — 30 %;

d) Cogeração a biomassa — 30 %;

e) Pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável — percentagem prevista nas alíneas anteriores aplicável ao tipo de energia renovável utilizado para a produção do hidrogénio;

f) Combinação das fontes de energia previstas nas alíneas anteriores na mesma unidade — a média ponderada das percentagens individuais aplicáveis utilizando como factor de ponderação os limites máximos de energia aplicáveis nos termos previstos no n.º 6.

6 — A electricidade vendida nos termos do número anterior é limitada a 2,4 MWh/ano, no caso da alínea a) do número anterior, e a 4 MWh/ano, no caso das restantes alíneas do mesmo número, por cada quilowatt instalado.

7 — A potência de ligação registada no regime bonificado é sujeita a um limite anual.

8 — O limite previsto no número anterior é de 10 MW no ano de entrada em vigor do presente decreto-lei, sendo aumentado, anual e sucessivamente, em 20 %.

Artigo 12.º

Facturação, contabilidade e relacionamento comercial

1 — O comercializador de último recurso deve celebrar o contrato de compra e venda da electricidade resultante da microprodução, nos termos do artigo 19.º, e assegurar o seu pagamento, excepto nos casos em que o produtor opte pela celebração daquele contrato com outro comercializador.

2 — O pagamento referido no número anterior é feito directamente ao produtor, mediante transferência bancária e, sempre que possível, juntamente com os

pagamentos relativos à instalação eléctrica de utilização.

3 — Sem prejuízo do disposto no número anterior, nos casos em que o produtor celebre contrato de financiamento para a aquisição da instalação de microprodução, pode optar pela realização do pagamento por parte do comercializador ou do comercializador de último recurso, consoante o caso, até 75 % do valor adquirido com a venda de electricidade, directamente à entidade financiadora, nos termos e duração previstos naquele contrato.

4 — A facturação relativa à electricidade resultante da microprodução é processada pelo comercializador ou pelo comercializador de último recurso, consoante o caso, nos termos do n.º 11 do artigo 35.º do Código do IVA, sem necessidade de acordo escrito do produtor.

5 — No caso de produtores que não se encontrem enquadrados, para efeitos de IVA, no regime normal de tributação e relativamente às transmissões de bens que venham a derivar exclusivamente da microprodução de energia eléctrica, é aplicável, com as necessárias adaptações, o regime especial de entrega de imposto previsto no artigo 10.º do Decreto-Lei n.º 122/88, de 20 de Abril, devendo os comercializadores, em sua substituição, dar cumprimento às obrigações de liquidação e entrega do imposto.

CAPÍTULO III Registo

e ligação à rede Artigo

13.º

Registo

1 — Para instalar uma unidade de microprodução, o interessado deve proceder ao seu registo no SRM, mediante o preenchimento de formulário electrónico a aprovar por despacho do director-geral de Energia e Geologia, disponibilizado no sítio da Internet da DGEG, que inclui o tipo de regime remuneratório pretendido e o comercializador com o qual pretenda celebrar o respectivo contrato de compra e venda de electricidade.

2 — O registo, em caso de correcto preenchimento do formulário e não estando ultrapassados os limites de potência previstos no n.º 7 do artigo 11.º e nos n.ºs 6 e 7 do artigo 4.º, é aceite, a título provisório, até ao pagamento da taxa aplicável, através de terminal Multibanco ou de sistema de *homebanking*, no prazo máximo de cinco dias úteis, com base em informação disponibilizada pelo SRM.

3 — Após o registo provisório, o requerente tem 120 dias para instalar a unidade de microprodução e requerer o certificado de exploração através do SRM, mediante o preenchimento de formulário electrónico.

4 — Em caso de incumprimento de qualquer uma das obrigações previstas nos n.ºs 2 e 3, o registo é anulado automaticamente.

5 — Durante o período previsto no n.º 3, podem ser solicitados pela DGEG, ou pela entidade com competências delegadas por esta, ao produtor os esclarecimentos que sejam considerados necessários para se poder efectuar a inspecção prevista no presente decreto-lei.

6 — No caso de o produtor pretender efectuar alguma alteração na sua instalação de microprodução, deve proceder a novo registo aplicável à totalidade da instalação, que substitui o anterior, mantendo-se a data da instalação inicial para efeitos da aplicação do artigo 11.º

Artigo 14.º

Inspecção

1 — O certificado de exploração é emitido na sequência de inspecção, que deve ser efectuada nos 20 dias subsequentes ao pedido previsto no n.º 3 do artigo anterior, com marcação de dia e hora em que a mesma se vai realizar, devendo esta ser comunicada ao produtor e técnico responsável pelos meios electrónicos disponíveis.

2 — Na inspecção é verificado se as unidades de microprodução estão executadas de acordo com o disposto no presente decreto-lei e regulamentação em vigor, se a instalação de utilização cumpre os requisitos previstos na alínea b) do n.º 1 do artigo 9.º para acesso ao regime bonificado, se o respectivo contador cumpre as especificações e está correctamente instalado e devidamente selado e são efectuados os ensaios necessários para verificar o adequado funcionamento dos equipamentos.

3 — Os ensaios previstos no número anterior destinam-se a verificar os valores fixados no prEN50438, de Julho de 2005, relativamente a máximo e mínimo de tensão, máximo e mínimo de frequência, *flicker* e harmónicas e outros que venham a ser definidos por despacho do director-geral de Energia e Geologia, previsto no n.º 3 do artigo 7.º

4 — Na inspecção deve estar sempre presente o técnico responsável por instalações eléctricas de serviço particular, ao serviço da entidade instaladora, ao qual compete esclarecer todas as dúvidas que possam ser suscitadas no acto da inspecção.

5 — Se a unidade de microprodução estiver em condições de ser ligada à RESP, é entregue pelo inspector ao produtor ou ao técnico responsável presente, no final da inspecção, o relatório de inspecção que, em caso de parecer favorável, substitui o certificado de exploração a remeter posteriormente ao produtor pela entidade responsável pelo SRM.

6 — No caso de não emissão de parecer favorável é sido autorizada sem recurso a uma segunda inspecção, a entidade responsável pelo SRM pode utilizar o critério da amostragem e sorteio para a realização de inspecções.

2 — Nos casos de dispensa de inspecção previstos no número anterior, o certificado de exploração deve ser emitido pela entidade responsável pelo SRM e enviado ao produtor.

Artigo 17.º

Contagem de electricidade

1 — O sistema de contagem de electricidade e os equipamentos que asseguram a protecção da interligação devem ser colocados em local de acesso livre ao comercializador ou ao comercializador de último recurso, consoante o caso, ao operador da rede de distribuição, bem como às entidades competentes para efeitos do presente decreto-lei.

2 — A contagem da electricidade produzida é feita por telecontagem mediante contador bidireccional, ou contador que assegure a contagem líquida dos dois sentidos, autónomo do contador da instalação de consumo.

3 — Não é aplicável aos produtores de unidades de microprodução a obrigação de fornecimento de energia reactiva.

Artigo 18.º

entregue no próprio dia da inspecção uma nota com as cláusulas que devem ser cumpridas para colmatar as deficiências encontradas.

Artigo 15.º

Segunda inspecção

1 — Sempre que na inspecção prevista no artigo anterior sejam detectadas deficiências que ponham em perigo pessoas e bens, é necessária uma segunda inspecção para emissão do respectivo certificado de exploração.

2 — Após a data da primeira inspecção, o produtor dispõe do prazo de 30 dias para proceder às correcções necessárias e agendar nova inspecção, findo o qual fica automaticamente marcada para o 1.º dia útil seguinte ao termo daquele prazo uma segunda inspecção.

3 — A segunda inspecção prevista no presente artigo é objecto de uma taxa, que o produtor deve pagar através de terminal Multibanco ou de sistema de *homebanking*, com base em informação disponibilizada pelo SRM, antes da data prevista para a sua realização.

4 — Se na segunda inspecção se mantiverem deficiências que ponham em perigo pessoas e bens, não é autorizada a ligação à RESP da unidade de microprodução, procedendo-se, neste caso, ao cancelamento do registo da unidade de microprodução.

5 — O não pagamento da taxa prevista no n.º 3 ou a não realização da segunda inspecção nos prazos previstos no n.º 2, por motivos imputáveis ao produtor, implica também o cancelamento do registo da unidade de microprodução.

Artigo 16.º

Dispensa de inspecção

1 — Após cinco inspecções a unidades de microprodução de um mesmo instalador, cuja ligação à RESP tenha

Controlo de equipamentos

1 — Os fabricantes, importadores, seus representantes e entidades instaladoras podem comprovar junto da entidade responsável pelo SRM que os seus equipamentos estão certificados e qual a natureza da certificação, devendo aquela entidade proceder à respectiva disponibilização no seu sítio na Internet.

2 — Os produtores que instalem equipamentos cuja certificação não tenha sido previamente comprovada junto do SRM devem apresentar os respectivos certificados no acto da inspecção.

Artigo 19.º

Contrato de compra e venda de electricidade e ligação à rede

1 — Com a emissão do certificado de exploração nos termos do n.º 5 do artigo 14.º ou do n.º 2 do artigo 16.º, a entidade responsável pelo SRM notifica o comercializador com vista ao envio do contrato de compra e venda de electricidade ao respectivo produtor no prazo máximo de cinco dias úteis.

2 — O comercializador dá conhecimento, no mesmo prazo previsto no número anterior, mediante formulário electrónico disponibilizado pelo SRM, do envio do contrato previsto no número anterior.

3 — Nos casos em que o comercializador identificado no registo, nos termos do n.º 1 do artigo 13.º, comunique junto do SRM não pretender celebrar contrato de compra e venda de electricidade nos termos do presente artigo, a entidade responsável pelo SRM notifica o comercializador de último recurso para os efeitos do n.º 1, dando conhecimento ao produtor.

4 — O contrato de compra e venda de electricidade previsto no n.º 1 deve seguir o modelo de contrato a aprovar pelo director-geral de Energia e Geologia.

5 — Após a celebração do contrato previsto no número anterior, o produtor deve informar da sua celebração no sítio da Internet da entidade responsável pelo SRM, devendo esta solicitar, automaticamente, ao operador da rede de distribuição a ligação da unidade de microprodução à RESP.

6 — O operador da RESP deve proceder à ligação da unidade de microprodução, no prazo máximo de 10 dias úteis após a notificação pela entidade responsável pelo SRM.

7 — A data de ligação à rede pública deve ser actualizada pelo operador da rede de distribuição, em formulário electrónico específico para o efeito, disponibilizado pelo SRM.

Artigo 20.º

Alteração de titularidade

1 — Quando houver alteração do titular do contrato de compra e venda de electricidade do local de consumo onde está instalada a unidade de microprodução, o novo titular pode registar-se como produtor, substituindo o anterior.

2 — É permitida a transferência de uma unidade de microprodução para novo local de consumo, devendo o produtor proceder nos termos do presente decreto-lei como se tratasse de instalação nova.

3 — No caso previsto no número anterior, deve manter-se o número e a data de registo, bem como o regime remuneratório que o produtor detinha antes da alteração do local da instalação.

Artigo 21.º

Reconhecimento de investimentos e custos

1 — O comercializador, que celebre um contrato de compra e venda de electricidade nos termos do artigo 19.º, pode vender a electricidade adquirida ao comercializador de último recurso nas mesmas condições, nos termos a definir no Regulamento de Relações Comerciais.

2 — O reconhecimento dos custos de aquisição de energia pelo comercializador de último recurso de acordo com os regimes previstos no artigo 9.º é realizado de acordo com o estabelecido no artigo 55.º do Decreto-Lei n.º 172/2006, de 23 de Agosto, na redacção que lhe foi dada pelo Decreto-Lei n.º 264/2007, de 24 de Julho.

3 — O reconhecimento para efeitos tarifários dos investimentos e custos incorridos pelo comercializador de último recurso com a implementação ou alteração dos sistemas informáticos de facturação e outros, necessários para a execução do presente decreto-lei é realizado nos termos previstos no artigo 62.º do Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de Fevereiro.

CAPÍTULO IV

Disposições finais

Artigo 22.º

Monitorização e controlo

1 — As unidades de microprodução ficam sujeitas à monitorização e controlo pela entidade responsável pelo SRM, para verificar as condições de protecção da interligação com a RESP e as características da instalação previstas no registo.

2 — A monitorização prevista no número anterior abrange anualmente pelo menos 1 % das instalações registadas, podendo as instalações ser seleccionadas por amostragem e sorteio.

3 — Para efeitos do número anterior, os produtores devem facilitar o acesso às respectivas instalações de produção à entidade responsável pelo SRM.

Artigo 23.º

Taxas

1 — Estão sujeitos a pagamento de taxa os seguintes actos:

- a) Registo da instalação de microprodução;
- b) Realização de uma segunda inspecção.

2 — As taxas previstas no número anterior são liquidadas à entidade responsável pelo SRM, constituindo receita desta.

3 — Os montantes das taxas são definidas por portaria do membro do Governo responsável pela área da economia, a publicar no prazo de 30 dias da entrada em vigor do presente decreto-lei.

Artigo 24.º

Contra-ordenações e sanções acessórias

1 — Constitui contra-ordenação punível com coima de € 500 a € 2500, no caso de pessoas singulares, e de € 1000 a € 40 000, no caso de pessoas colectivas:

- a) A violação do disposto no n.º 3 do artigo 4.º;
- b) A violação do disposto nas alíneas a) a d) do artigo 6.º;
- c) A violação do disposto nos n.ºs 1, 2 e 4 do artigo 8.º;
- d) Vender electricidade através do regime bonificado sem cumprir as condições estabelecidas na alínea b) do n.º 1 do artigo 9.º;
- e) A violação do disposto nos n.ºs 1 e 4 do artigo 12.º;
- f) A violação do disposto no n.º 6 do artigo 13.º;
- g) A ligação ou alteração da unidade de microprodução à rede de distribuição pública em inobservância ao disposto nos artigos 13.º, 14.º e 15.º;
- h) A violação do disposto nos n.ºs 1 e 2 do artigo 19.º

2 — Constitui contra-ordenação punível com coima de € 250 a € 1750, no caso de pessoas singulares, e de € 500 a € 20 000, no caso de pessoas colectivas:

- a) A violação do disposto nas alíneas e) e f) do artigo 6.º;
- b) A violação do disposto no n.º 3 do artigo 22.º;

c) Solicitar a emissão do certificado de exploração nos termos do n.º 3 do artigo 13.º sem que a instalação esteja concluída.

3 — A negligência é punível, sendo os limites mínimos e máximos das coimas aplicáveis reduzidas a metade.

4 — Conjuntamente com as coimas previstas no presente artigo pode ser aplicada, em função da gravidade da infracção e da culpa do agente, a sanção acessória de perda do direito ao regime bonificado e aplicação do regime geral nos casos previstos nas alíneas a), b), d) e f) do n.º 1.

5 — A DGEG procede à instrução dos processos de contra-ordenação e sanção acessória, sendo o seu director-geral competente para a aplicação das coimas.

6 — O produto resultante da aplicação das coimas reverte em 60 % para o Estado e em 40 % para a DGEG.

Artigo 25.º

Regiões Autónomas

1 — O presente decreto-lei aplica-se às Regiões Autónomas, sem prejuízo das adaptações decorrentes da aplicação do disposto no número seguinte, bem como das especificidades do exercício das actividades de produção, transporte, distribuição e comercialização de electricidade nas Regiões Autónomas.

2 — As competências cometidas pelo presente decreto-lei à DGEG, ou a entidade com competências delegadas por esta, e a serviços ou outros organismos da administração central são exercidas pelos correspondentes serviços e organismos das administrações regionais com idênticas atribuições e competências, ou pelas entidades com competências delegadas por estes, sem prejuízo das competências

de outras entidades de actuação com âmbito nacional.

Artigo 26.º

Legislação aplicável

Sem prejuízo do disposto no artigo 21.º, não se aplicam os regimes constantes do Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março, e do Decreto-Lei n.º 312/2001, de 10 de Dezembro.

Artigo 27.º

Entrada em vigor

O presente decreto-lei entra em vigor 90 dias após a data da sua publicação.

Visto e aprovado em Conselho de Ministros de 13 de Setembro de 2007. — *José Sócrates Carvalho Pinto de Sousa* — *Fernando Teixeira dos Santos* — *Alberto Bernardes Costa* — *Francisco Carlos da Graça Nunes Correia* — *António José de Castro Guerra*.

Promulgado em 19 de Outubro de 2007.

Publique-se.

O Presidente da República, ANÍBAL CAVACO SILVA.

Referendado em 25 de Outubro de 2007.

O Primeiro-Ministro, *José Sócrates Carvalho Pinto de Sousa*.

12.3 PORTARIA Nº201/2008 DE 22 DE FEVEREIRO

MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DA INOVAÇÃO

Portaria n.º 201/2008

de 22 de Fevereiro

O Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico aplicável à produção de electricidade através de unidades de microprodução, atribui à Direcção-Geral de Energia e Geologia (DGEG) competências para a coordenação do respectivo processo de gestão, o qual está centralizado numa plataforma electrónica designada por SRM — Sistema de Registo de Microprodução, que deve conter o registo das unidades de microprodução, com todos os elementos previstos naquele diploma legal.

Para prossecução da implementação do processo torna-se necessário, nos termos do n.º 3 do artigo 23.º do supracitado decreto-lei, proceder à fixação das taxas a cobrar no âmbito da prestação de serviços relativos ao registo da instalação de microprodução no SRM e da realização de

uma eventual segunda inspecção (reinspecção), tendo em vista a emissão do respectivo certificado de exploração.

Assim:

Ao abrigo do n.º 3 do artigo 23.º do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, manda o Governo, pelo Ministro da Economia e da Inovação, o seguinte:

1.º As taxas a cobrar pelos serviços previstos no n.º 1 do artigo 23.º do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, são as seguintes:

a) Taxa de registo da instalação de microprodução: € 250;

b) Taxa de reinspecção: € 150.

2.º O pagamento das taxas referidas no número anterior deve ser efectuado nas condições previstas no SRM — Sistema de Registo de Microprodução, cujo acesso é estabelecido através de sítio da Internet.

3.º As taxas referidas no n.º 1 são actualizáveis, em Janeiro, com base na evolução anual do índice de preços no consumidor no continente, excluindo habitação, sendo

o valor final arredondado para a dezena de cêntimos de euro imediatamente superior.

4.º Às taxas previstas no n.º 1.º acresce o IVA à taxa de 12 %, no caso das instalações cujas fontes de energia sejam totalmente renováveis, ou à taxa normal, nos restantes casos.

O Ministro da Economia e da Inovação, *Manuel António Gomes de Almeida de Pinho*, em 31 de Janeiro de 2008.

12.4 DECRETO LEGISLATIVO REGIONAL Nº16/2008/M

REGIÃO AUTÓNOMA DA MADEIRA

Assembleia
Legislativa

Decreto Legislativo Regional n.º 16/2008/M

Adapta à Região Autónoma da Madeira o Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microprodução.

O Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, estabelece o regime jurídico à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microprodução.

O referido diploma pretende simplificar o regime de licenciamento existente, cria o Sistema de Registo da Microprodução (SRM) assim como regimes de incentivos associados à venda de electricidade para promoção de água quente solar.

Assim:

A Assembleia Legislativa da Região Autónoma da Madeira decreta, ao abrigo da alínea a) do n.º 1 do artigo 227.º e do n.º 1 do artigo 228.º da Constituição da República Portuguesa e da alínea c) do n.º 1 do artigo 37.º do Estatuto Político-Administrativo da Região Autónoma da Madeira, aprovado pela Lei n.º 13/91, de 5 de Junho, com as alterações introduzidas pelas Leis n.ºs 130/99, de 21 de Agosto, e 12/2000, de 21 de Junho, o seguinte:

Artigo 1.º

Objecto

O presente diploma adapta à Região Autónoma da Madeira o Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, que estabelece o regime jurídico à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microprodução.

Artigo 2.º

Atribuição de competência

As competências atribuídas pelo Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, à Direcção-Geral de Energia e Geologia e à direcção regional de economia competente são exercidas, na Região Autónoma da Madeira, pela Direcção Regional do

Comércio, Indústria e Energia.

Artigo 3.º

Portarias

As portarias a que se refere o Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, são aplicáveis à Região Autónoma da Madeira, sem prejuízo das adaptações decorrentes das especificidades da Região.

Artigo 4.º

Prazos

Os prazos previstos nos n.ºs 3 do artigo 13.º e 2 do artigo 15.º do Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, da Região Autónoma da Madeira são de 180 e de 60 dias, respectivamente.

Artigo 5.º

Contra-ordenações e sanções acessórias

1 — A Direcção Regional do Comércio, Indústria e Energia procede à instrução dos processos de contra-ordenação e sanção acessória, sendo o director regional competente para a aplicação das coimas.

2 — O produto resultante da aplicação das coimas constitui receita própria da Região Autónoma da Madeira.

Artigo 6.º

Entrada em vigor

O presente diploma entra em vigor no dia seguinte ao da sua publicação.

Aprovado em sessão plenária da Assembleia Legislativa da Região Autónoma da Madeira em 23 de Abril de 2008.

O Presidente da Assembleia Legislativa, *José Miguel Jardim d'Olival Mendonça*.

Assinado em 23 de Maio de 2008. Publique-se.

O Representante da República para a Região Autónoma da Madeira, *Antero Alves Monteiro Diniz*.

12.5 LISTAGEM DE INVERSORES HOMOLOGADOS

Listagem de Inversores				
Marca/Fabricante	Modelo	Certificado		Observações
		Número	Validade	
Carlo Gavazzi Logistics SpA	ISMG 1 45 DE	U09-083	31-12-2010	
Carlo Gavazzi Logistics SpA	ISMG 1 50 DE	U09-083	31-12-2010	Para o Regime Geral
Carlo Gavazzi Logistics SpA	ISMG 1 60 DE	U09-083	31-12-2010	Para o Regime Geral
Conergy AG	IPG 2000	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 2000 vision	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 3000	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 3000 vision	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 4000	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 4000 vision	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 5000	07-031	13-03-2010	
Conergy AG	IPG 5000 vision	07-031	13-03-2010	
Danfoss Solar Inverters	ULX 1800i	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	
Danfoss Solar Inverters	ULX 1800o	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	
Danfoss Solar Inverters	ULX 3600i	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	
Danfoss Solar Inverters	ULX 3600o	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	
Danfoss Solar Inverters	ULX 5400i	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	Para o Regime Geral
Danfoss Solar Inverters	ULX 5400o	LB.010.00/3-2388	31-12-2010	Para o Regime Geral
Delta Energy Systems	SI 2500	U08-173	10-10-2011	
Delta Energy Systems	SI 3300	U08-163	07-10-2011	
Delta Energy Systems	SI 5000	U08-211	18-11-2011	Para o Regime Geral
DonQi	UWT-Inverter	212791100	31-12-2013	
Fagor Automation	FSI 2.5	9007	31-12-2014	
FRONIUS	FRONIUS IG 15	2.04.00391.1.0	31-12-2011	
FRONIUS	FRONIUS IG 20	2.04.00391.1.0	31-12-2011	
FRONIUS	FRONIUS IG 30	2.04.00391.1.0	31-12-2011	
FRONIUS	FRONIUS IG 40	2.04.00391.1.0	31-12-2011	
FRONIUS	FRONIUS IG 60	2.04.00391.1.0	31-12-2011	Para o Regime Geral
FRONIUS	FRONIUS IG 60HV	2.04.00391.1.0	31-12-2011	Para o Regime Geral
FRONIUS	FRONIUS IG PLUS 35	2.04.00403.1.0	31-12-2012	

Inversor para Sistemas Domésticos de Produção de Energia

FRONIUS	FRONIUS IG PLUS 50	2.04.00391.1.0	31-12-2012	Para o Regime Geral
INGETEA S.A.	INGECON SUN 3.45TL	8015	31-12-2011	
INGETEA S.A.	INGECON SUN 3.68TL	8015	31-12-2011	
KACO GmbH	POWADOR 1501xi	U07-132	26-03-2013	Com transformador de isolamento
KACO GmbH	POWADOR 2002	U09-111	25-05-2012	
KACO GmbH	POWADOR 2500xi	U09-191	04-09-2012	
KACO GmbH	POWADOR 3002	U09-111	25-05-2012	
KACO GmbH	POWADOR 3500xi	U07-133	26-03-2013	
KACO GmbH	POWADOR 3501xi	U07-132	26-03-2013	Com transformador de isolamento
KACO GmbH	Powador 3600xi	U09-191	04-09-2012	
KOSTAL Solar Electric GmbH	PIKO 3.0	U09-052	31-03-2012	
KOSTAL Solar Electric GmbH	PIKO 3.6	U09-052	31-03-2012	
Mastervolt International B.V.	XL3300	U08-058	22-06-2010	
Mastervolt International B.V.	XL3301	U08-058	22-06-2010	
Mastervolt International B.V.	XL5000	U08-058	22-06-2010	Para o Regime Geral
Mastervolt International B.V.	XS2000	U08-067	07-03-2011	
Mastervolt International B.V.	XS3200	U08-067	07-03-2011	
Mastervolt International B.V.	XS4300	U08-067	07-03-2011	
Mastervolt International B.V.	XS4500	U07-080	20-07-2010	Para o Regime Geral
Mitsubishi Electric Corporation	PV-PNSXXATL-GER	DIN V VDE V 0126-1-1	31-12-2010	
Pairan Elektronik GmbH	PVI 2300	U09-003	16-01-2012	
Pairan Elektronik GmbH	PVI 3500	U09-003	16-01-2012	
Pairan Elektronik GmbH	PVI 5000	U09-003	16-01-2012	Para o Regime Geral
POWER-ONE ITALY SPA	PVI-3.0-OUTD-DE/S-DE/DS-DE/DE-W	2.04.00536.1.0	07-05-2011	
POWER-ONE ITALY SPA	PVI-3.6-OUTD-DE/S-DE/DS-DE/DE-W	2.04.00536.1.0	07-05-2011	
POWER-ONE ITALY SPA	PVI-4.2-OUTD-DE/S-DE/DS-DE/DE-W	2.04.00536.1.0	07-05-2011	Para o Regime Geral
POWER-ONE ITALY SPA	PVI-5000 OUT-DE/DE-S/DE-DS	AZ 2.04.00389.1.0	12-06-2009	Para o Regime Geral
Schneider Electric Portugal	PVS NV1 2000	40019087	30-09-2010	
Schneider Electric Portugal	PVS NV1 2800	40019087	30-09-2010	
Schneider Electric Portugal	PVS NV1 4000	40019087	30-09-2010	
Schneider Electric Portugal	PVS NV1 400E	40019087	30-09-2010	
Schneider Electric Portugal	PVS NV1 600E	40019087	30-09-2010	
Schüco International KG	SGI 1500Tplus	U08-135	27-06-2011	
Schüco International KG	SGI 3500Tplus	U08-135	27-06-2011	
Siemens AG	SITOP SX25FI-PR2	06-019	04-05-2009	

Skystreamenergy	Skystream 3.7	73129-13		
SMA Solar Technology AG	SB 1100	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 1100 LV	7006	31-12-2012	
SMA Solar Technology AG	SB 1700	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 2100 TL	7006	31-12-2012	
SMA Solar Technology AG	SB 2500	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 2800	7006	31-12-2012	
SMA Solar Technology AG	SB 3000	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 3000TL-20	9003	31-12-2011	
SMA Solar Technology AG	SB 3300	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 3800/V	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SB 4000TL-20	9003	31-12-2011	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SB 5000TL-20	9003	31-12-2011	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SB 700	7006	31-12-2012	
SMA Solar Technology AG	SMC 10000TL-10	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 11000TL-10	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 4600A	7006	31-12-2012	C Transf Isolam/Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 5000A	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	SMC 6000A	7006	31-12-2012	C Transf Isolam/Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 6000TL	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 7000TL	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 8000TL	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	SMC 9000TL-10	7006	31-12-2012	Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 1100	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 1100 LV	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 1700	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 2500	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 3000	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 3300	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 3800	7006	31-12-2012	C Transf Isolam/Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 3800V	7006	31-12-2012	Com Transformador de Isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SB) 700	7006	31-12-2012	Com transformador de isolamento
SMA Solar Technology AG	WB (SMC) 5000A	7006	31-12-2012	C Transf Isolam/Para o Regime Geral
SMA Solar Technology AG	WB (SMC) 6000A	7006	31-12-2012	C Transf Isolam/Para o Regime Geral
Solar Max	SI 2000S	DIN V VDE V 0126-1-1	31-12-2013	

Solar Max	SI 3000S	DIN V VDE V 0126-1-1	31-12-2013	
Solar Max	SI 4200S	DIN V VDE V 0126-1-1	31-12-2013	
Solar Max	SI 6000S	DIN V VDE V 0126-1-1	31-12-2013	Para o Regime Geral
Steca	StecaGrid 2000+	7002	31-12-2011	
Steca	StecaGrid Control D1	8001	31-12-2009	Associado c/ Inversor Série MiniString
SUNSET Energietechnik GmbH	SUN3Grid 4000	U08-102	27-06-2011	Para o Regime Geral
SUNSET Energietechnik GmbH	SUNstring 4000	U08-101	27-06-2011	
Sunways AG	AT 2700	U08-120	25-07-2011	
Sunways AG	AT 3600	U08-120	25-07-2011	
Sunways AG	AT 4500	U08-120	25-07-2011	Para o Regime Geral
Sunways AG	AT 5000	U08-120	25-07-2011	Para o Regime Geral
Sunways AG	NT 2500	U09-173	24-08-2012	
Sunways AG	NT 3700	U09-173	24-08-2012	
Sunways AG	NT 4200	U09-173	24-08-2012	Para o Regime Geral
Sunways AG	NT 5000	U09-173	24-08-2012	Para o Regime Geral
Xantrex Technology S.L.	GT2.5-DE-QC-230	8010	31-12-2011	
Xantrex Technology S.L.	GT3.8-DE-QC-230	8010	31-12-2011	
ZIGOR Corporation, SA	ES 4200	O8TWS1294-01	29-04-2013	

Tabela 10: Listagem de Inversores Homologados

12.6 ESQUEMAS ELECTRÓNICOS

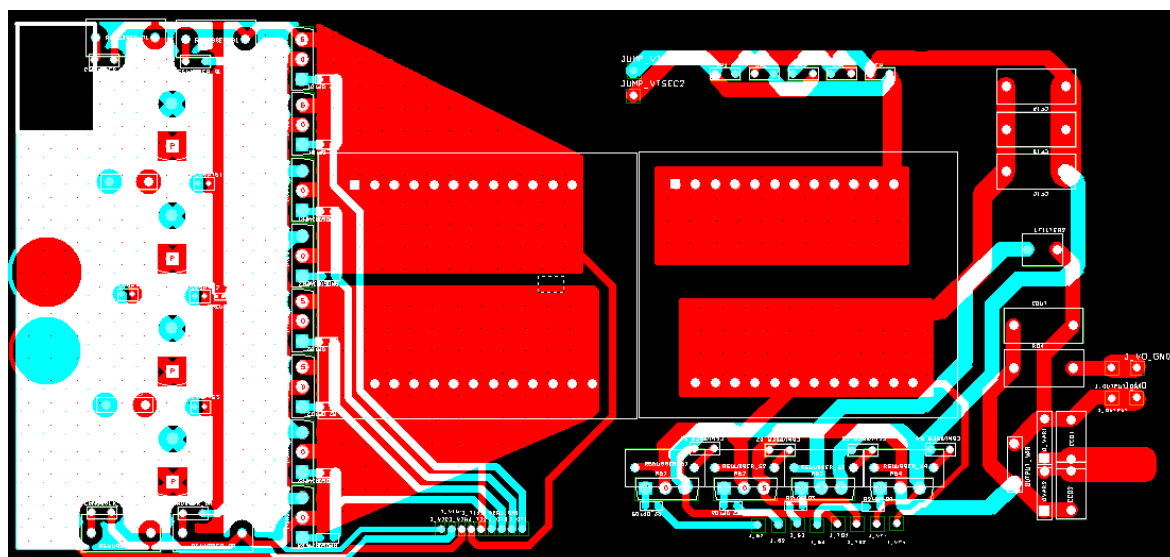


Figura 104: Layout da Placa de Potência

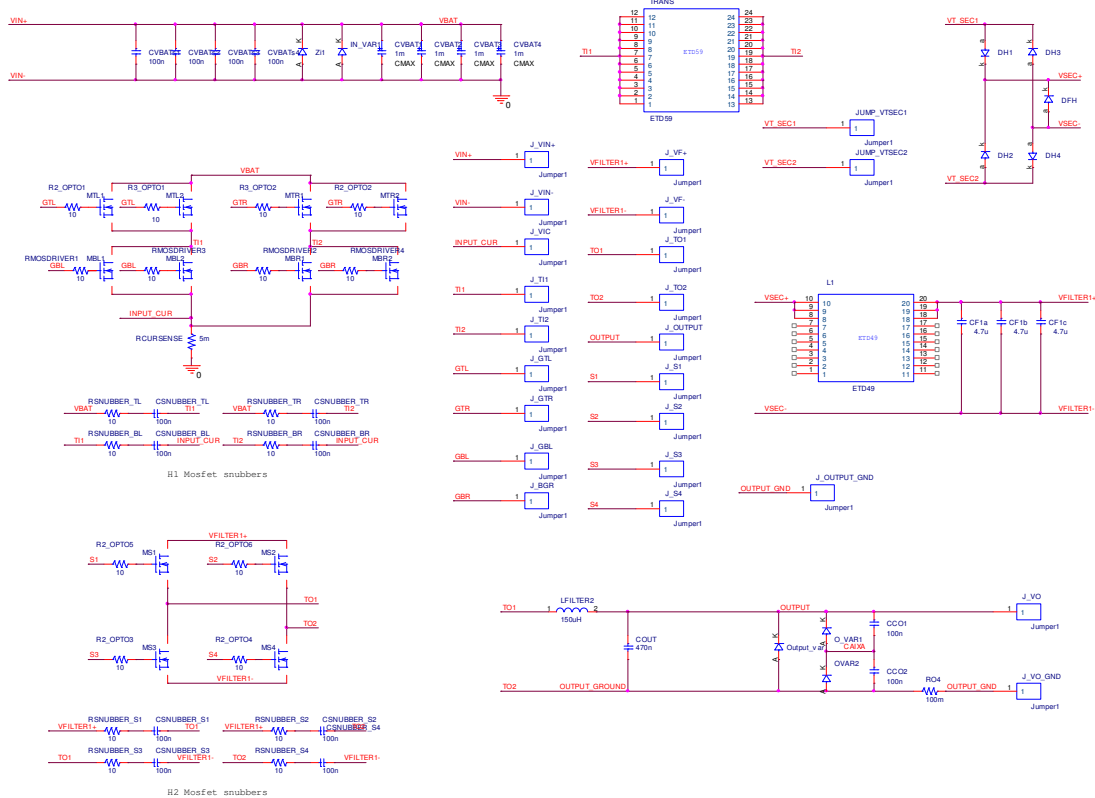


Figura 105: Esquemas Eléctricos da Placa de Potência

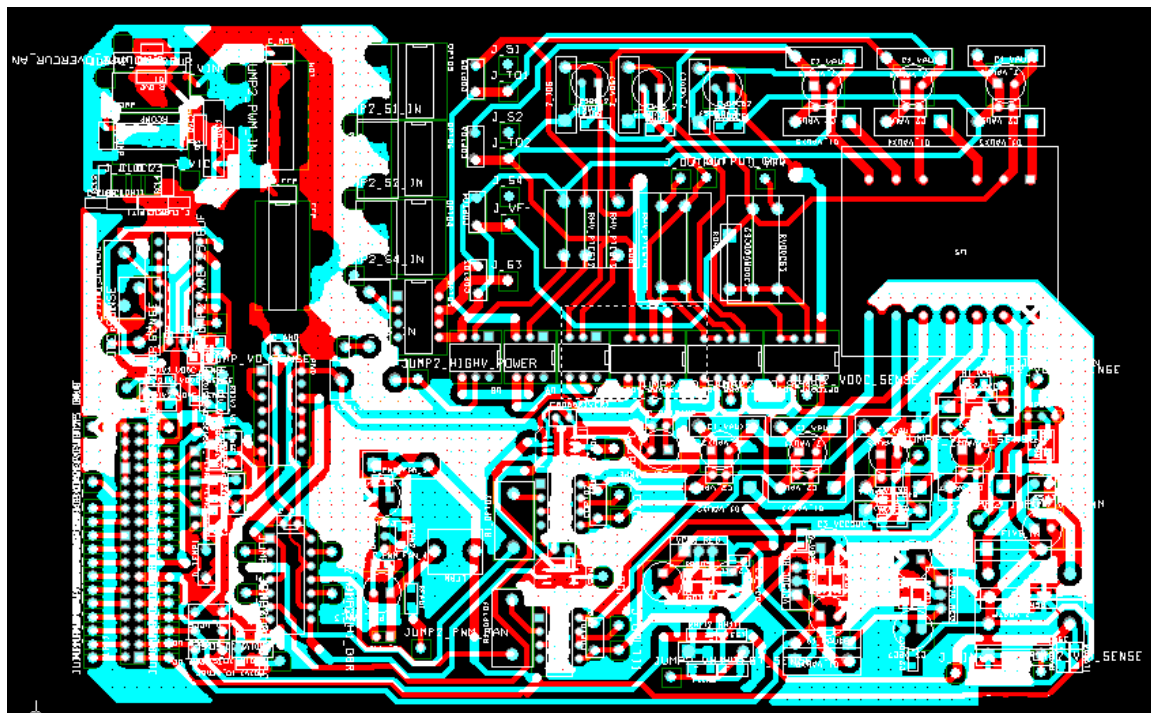


Figura 106: Layout da Placa de Interface

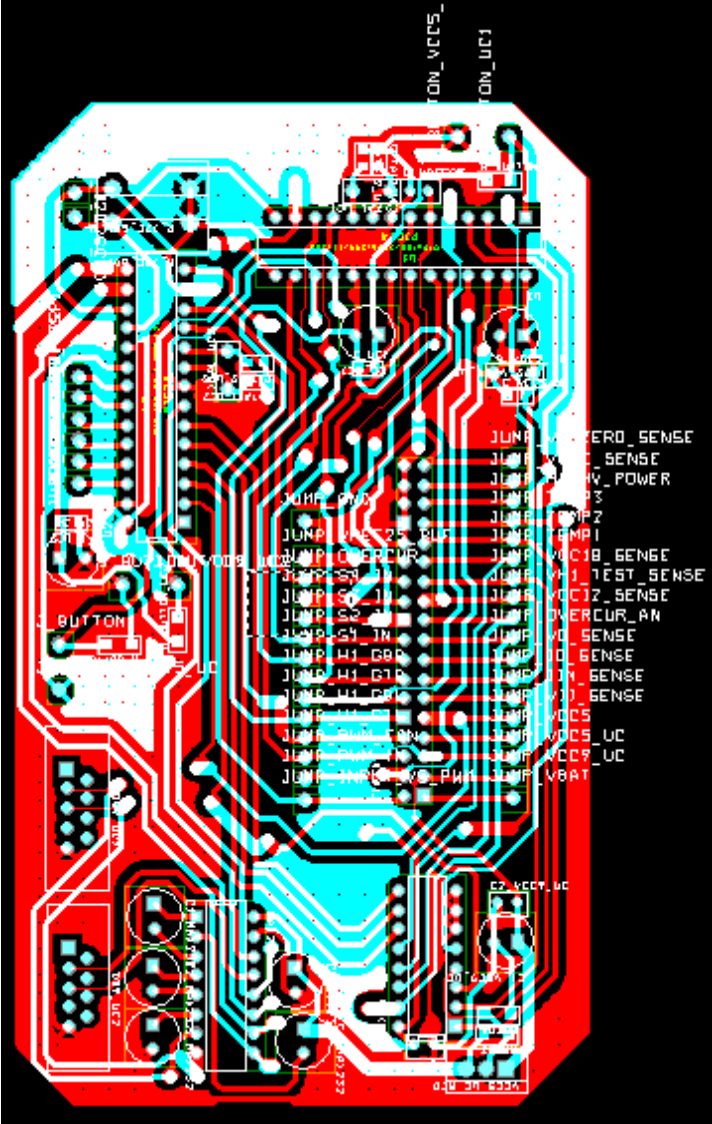


Figura 108: *Layout* da Placa de Controle

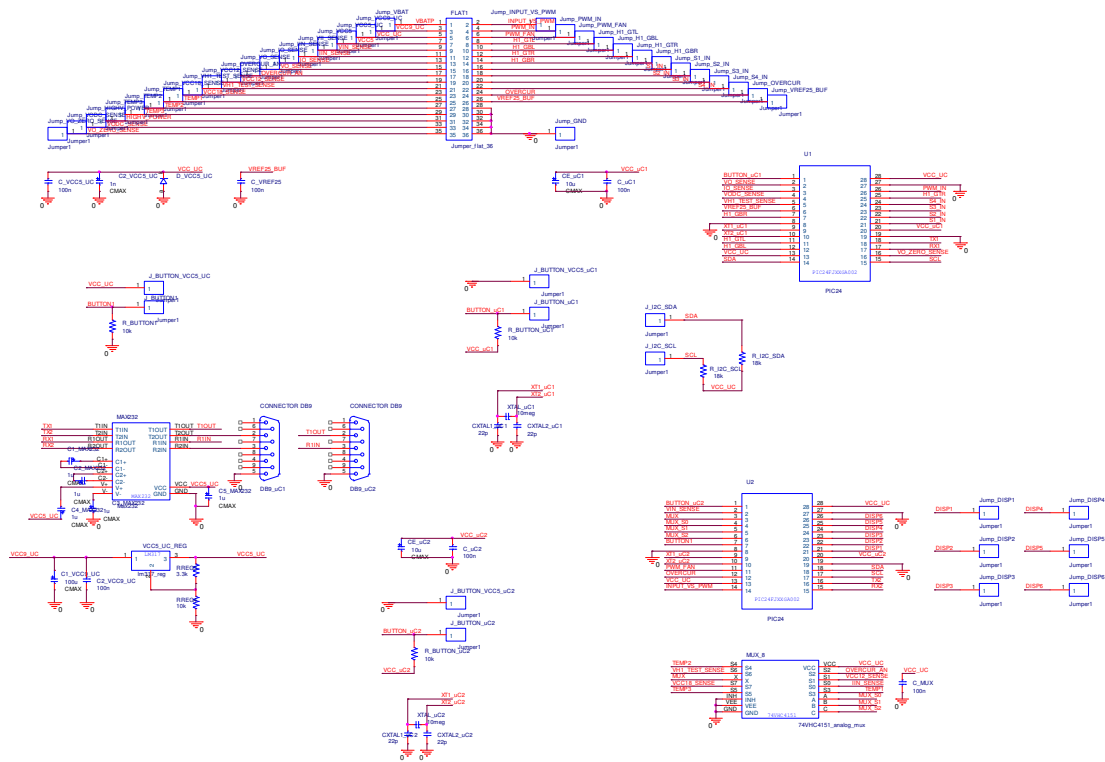


Figura 109: Esquemas Eléctricos da Placa de Controlo

12.7 SOFTWARE (CÓDIGO)

Em anexo electrónico.